

# 测量激光束横模结构的方法研究

周 娜 王石语 过 振 蔡德芳 文建国 李兵斌

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 分析了根据激光场强度相对分布计算激光束横模结构的方法,根据分析结果设计了利用光场分布测量激光束横模结构的实验方法。对所设计的方法进行了仿真验证,同时通过具体实验,对一款调 Q 激光二极管抽运固体激光器(DPL)的激光束横模结构进行了测量。实验中,在不知道谐振腔参数的情况下,根据设计的方法测量了激光束的各阶横模比例。以测量出的横模比例为基础,理论上重构出激光束,该光束和实际光束的空间传输过程基本吻合。

**关键词** 激光技术;测量;激光束;横模;脉冲激光器

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0108004

## Study of Measuring Method of Transverse Mode Configuration in a Laser Beam

Zhou Na Wang Shiyu Guo Zhen Cai Defang Wen Jianguo Li Bingbin

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** A new measuring method of transverse mode configuration in a laser beam is presented. It is based on the spatial relative intensity distribution of laser field. The simulation indicates that the measuring method is feasible. An experiment is also conducted to measure transverse mode configuration for a Q-switched laser diode pumped solid state laser (DPL). Without cavity parameters, the transverse mode proportion is figured out with these testing data by using this new measuring method. Based on this measured transverse mode proportion, the laser beam is also reconstructed theoretically, and it agrees well with the spatial transmission of the laser beam for measuring.

**Key words** laser technique; measurement; laser beam; transverse mode; pulsed laser

**OCIS codes** 140.3295; 140.3460; 140.3538

## 1 引 言

激光光束质量是评价激光器性能的一项重要指标,广泛应用于激光器的理论分析、设计、制造、检测、应用和维护等,是应用激光研究领域的基础性研究问题。激光光束质量有很多评价参数,主要有聚焦光斑尺寸、远场发散角、斯特列尔比、衍射极限倍数因子、光束参数乘积、桶中功率(能量)和  $M^2$  因子等<sup>[1~3]</sup>。目前关于光束质量的测量方法研究已有很多<sup>[4~15]</sup>,测量技术在实现实时高精度测量方面有了很大发展。激光器特别是高功率激光器中多个横模

参与振荡正是影响光束质量的重要原因,因此激光横模结构的研究对描述激光光束质量具有重要意义。文献[12,13]都对激光横模结构测量方法进行了研究,但是实际操作都比较复杂。本文提出一种通过激光场强度相对分布来测量激光横模结构的方法,操作简单,精度高,更易于激光束横模结构的测量。

## 2 理论基础

以脉冲激光器为例,用  $TEM_m$  表示其激光腔模

收稿日期:2010-06-01;收到修改稿日期:2010-08-30

作者简介:周 娜(1985—),女,硕士研究生,主要从事固体激光器不稳定性方面的研究。

E-mail:zhouna.1110@yahoo.com.cn

导师简介:过 振(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事固体激光器件和激光技术方面的研究。

E-mail:zhguo@xidian.edu.cn

式,  $m$  和  $n$  表示横模序数。为了和后面仿真验证实例和实验实例保持一致, 这里采用柱面坐标系描述空间变量, 其中  $z$  轴正方向为激光束传播方向。用  $I(r, \varphi, z, t)$  表示  $t$  时刻谐振腔外任一点  $Q(r, \varphi, z)$  处的激光强度, 则  $I(r, \varphi, z, t)$  反映了激光脉冲形状的空间分布, 为各个模式强度的叠加<sup>[16]</sup>, 即可以表示为

$$I(r, \varphi, z, t) = \sum_{mm} a_{mm}(t) c_{mm} E_{mm}(r, \varphi, z) \times E_{mm}^*(r, \varphi, z), \quad (1)$$

式中  $a_{mm}(t)$  表示  $t$  时刻 TEM<sub>mm</sub> 模的强度,  $E_{mm}(r, \varphi, z)$  表示 TEM<sub>mm</sub> 模的光场分布,  $c_{mm}$  为归一化系数, 满足等式

$$c_{mm} \iint_s E_{mm}(r, \varphi, z) E_{mm}^*(r, \varphi, z) ds = 1. \quad (2)$$

由于在实际情况下, 激光腔横模模式数目是有限的, 故可将激光腔横模模式按照由最低阶模式到高阶模式的顺序排列, 并采用自然数  $j$  进行编号。每个  $j$  值对应唯一的横模序数 ( $m, n$ ), 将激光腔横模模式的光场分布  $E_{mm}(r, \varphi, z)$  记为  $E_j(r, \varphi, z)$ 。若第  $j$  个激光腔横模模式的强度归一化分布表示为  $s_j(r, \varphi, z)$ , 则

$$s_j(r, \varphi, z) = c_j E_j(r, \varphi, z) E_j^*(r, \varphi, z). \quad (3)$$

假定激光腔只可能有  $N$  个横模模式可以起振, 代替(1)式, 谐振腔外任一点  $Q(r, \varphi, z)$  处的激光强度  $I(r, \varphi, z, t)$  可表示为

$$I(r, \varphi, z, t) = \sum_{j=1}^N p_j(t) s_j(r, \varphi, z), \quad (4)$$

式中  $p_j(t)$  为  $t$  时刻第  $j$  个激光腔横模模式的强度, 代表激光脉冲中第  $j$  个激光腔横模模式所贡献的功率。 $Q$  点处单位面积内激光单脉冲能量  $\epsilon(r, \varphi, z)$ , 输出激光单脉冲总能量  $\epsilon$ , 输出激光单脉冲中第  $j$  个激光腔横模模式的能量  $\epsilon_j$  和第  $j$  个激光腔横模模式在激光单脉冲总能量中所占比例  $k_j$  可分别表示为

$$\epsilon(r, \varphi, z) = \int_0^T I(r, \varphi, z, t) dt, \quad (5)$$

$$\epsilon = \int_0^T \sum_{i=1}^N p_i(t) dt, \quad (6)$$

$$\epsilon_j = \int_0^T p_j(t) dt, \quad (7)$$

$$k_j = \frac{\epsilon_j}{\epsilon} = \frac{\int_0^T p_j(t) dt}{\epsilon}, \quad (8)$$

式中  $T$  为输出激光脉冲周期。将(5)式两边同除以激光单脉冲总能量  $\epsilon$ , 并把(4), (6)和(7)式代入, 则有

$$\frac{\epsilon(r, \varphi, z)}{\epsilon} = \frac{\int_0^T \sum_{j=1}^N p_j(t) s_j(r, \varphi, z) dt}{\epsilon} = \sum_{j=1}^N \frac{\int_0^T p_j(t) dt}{\epsilon} s_j(r, \varphi, z) = \sum_{j=1}^N \frac{\epsilon_j}{\epsilon} s_j(r, \varphi, z), \quad (9)$$

将(8)式代入(9)式有

$$\sum_{j=1}^N k_j s_j(r, \varphi, z) = \frac{\epsilon(r, \varphi, z)}{\epsilon}, \quad (10)$$

(10)式右端表达式为单位面积内激光单脉冲能量和激光单脉冲总能量的比值, 表示激光场强度相对分布, 左边表达式为各激光腔横模模式所占比例和相应模式强度归一化分布的乘积。可以看出, 在给定腔内  $N$  个激光腔横模模式的强度归一化分布函数情况下, 如果测量出各激光腔横模模式所占比例就可以由(10)式拟合出相应的激光场强度相对分布曲线; 反之若已知激光场强度的相对分布, 就可以求解出相应各激光腔横模模式所占比例, 得到激光束横模结构。

(10)式即为根据激光场强度相对分布测量激光束横模结构的理论依据。可以首先测量出激光场强度空间分布, 对于给定的腔内  $N$  个激光腔横模模式的强度归一化分布函数, 再根据(10)式建立相应线性方程组即可求解出各阶横模所占比例。

### 3 算法构造

选取腔外平面  $z = z_0$  内  $M$  个点处的激光场强度相对值建立相应线性方程组,  $M$  的取值应不小于  $N$ 。将(10)式右端表达式简记为  $B(r, \varphi, z)$ , 则  $B(r, \varphi, z_0)$  表示腔外平面  $z = z_0$  内激光场强度相对分布, 并把第  $i$  个点处的激光场强度相对值  $B(r_i, \varphi_i, z_0)$  简记为  $B_i$ , 第  $i$  个点处第  $j$  个横模的强度归一化分布值  $s_j(r_i, \varphi_i, z_0)$  简记为  $A_{ij}$ 。由于平面  $z = z_0$  内  $M$  个点的激光场强度相对值均满足(10)式, 所以可以建立以激光单脉冲中各阶横模所占比例为未知参量的线性方程组为

$$\begin{cases} A_{11}k_1 + A_{12}k_2 + \dots + A_{1N}k_N = B_1 \\ A_{21}k_1 + A_{22}k_2 + \dots + A_{2N}k_N = B_2 \\ \vdots \\ A_{M1}k_1 + A_{M2}k_2 + \dots + A_{MN}k_N = B_M \end{cases} \quad (11)$$

对于给定各阶横模强度归一化函数, 则可以确定方程组(11)中的系数矩阵, 如果再给定平面  $z =$

$z_0$  处的  $M$  个点的激光场强度相对值  $B_1, B_2, \dots, B_M$  即可利用最小二乘逼近的数值方法求解线性方程组,用计算机软件编写相应程序求解出各阶横模比例。

## 4 仿真验证

对任意给定的一条激光场强度相对分布曲线进行仿真计算,求出各阶横模比例,以检验该方法的可行性。仿真验证过程分为以下三步:

1) 给出一激光场强度相对分布曲线和其相应的各阶横模比例;

2) 对这一曲线进行采样,构造如(11)式所示的方程组,寻找各阶横模强度归一化分布函数的一组最优解;

3) 根据各阶横模强度归一化分布函数的最优解计算各阶横模比例,将计算值和原始各阶横模比例给定值进行比较,若两组数据一致,则可验证该方法的可行性。

对可用圆形镜共焦腔等效的激光器,根据(3)式其激光腔横模强度归一化分布可以表示为<sup>[17]</sup>

$$s_j(r, \varphi, z) = c_j \left[ \frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 \left[ \sqrt{2} \frac{r}{\omega(z)} \right]^{2m} \times \left\{ L_n^m \left[ 2 \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right] \right\}^2 \exp \left[ -2 \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right], \quad (12)$$

式中  $c_j$  为归一化系数,  $L_n^m(\zeta)$  为对应的缔合拉盖尔多项式

$$L_n^m(\zeta) = \sum_{k=0}^n \frac{(n+m)! (-\zeta)^k}{(m+k)! k! (n-k)!}. \quad (13)$$

从(12)式可以看出给定基模光斑半径  $\omega(z)$  即可确定一组激光腔横模强度归一化分布函数。

根据(10)式,激光场强度相对分布  $B(r, \varphi, z)$  可表示为

$$B(r, \varphi, z) = \sum_{j=1}^N k_j c_j \left[ \frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 \left[ \sqrt{2} \frac{r}{\omega(z)} \right]^{2m} \times \left\{ L_n^m \left[ 2 \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right] \right\}^2 \exp \left[ -2 \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right], \quad (14)$$

记给定基模光斑半径和各阶横模比例分别为  $\omega^0(z)$  和  $k_1^0, k_2^0, \dots, k_N^0$ 。 $\omega^0(z)$  取为 0.88 mm,  $N$  取 3,  $k_1^0, k_2^0, \dots, k_N^0$  的取值如表 1 所示,根据(14)式得到如图 1 所示的激光场强度相对分布曲线。

对图 1 所示曲线进行采样,采样点数  $M$  取为 10,记采样值为  $B_1^0, B_2^0, \dots, B_M^0$ 。根据(11)和(12)式

由采样值计算任意基模光斑半径  $\omega(z)$  情况下各阶横模比例  $k_1, k_2, \dots, k_N$ ,然后将  $k_1, k_2, \dots, k_N$  和  $\omega(z)$  代入(14)式,得到采样点处激光场强度相对值  $B_1, B_2, \dots, B_M$ ,计算出  $B_1, B_2, \dots, B_M$  和  $B_1^0, B_2^0, \dots, B_M^0$  之间误差随基模光斑半径变化曲线,如图 2 所示。

表 1 各阶横模比例计算值和给定值比较

Table 1 Comparison of transverse mode proportion in calculation with given value

Transverse mode	TEM <sub>00</sub>	TEM <sub>01</sub>	TEM <sub>02</sub>
Given proportion	0.85	0.13	0.02
Calculated proportion	0.85	0.13	0.02

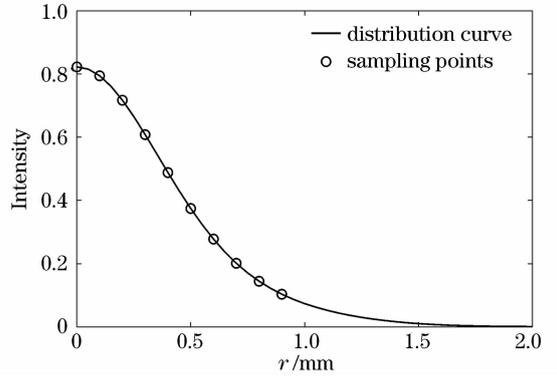


图 1 激光场强度相对分布曲线

Fig. 1 Spatial relative intensity distribution curve of laser field

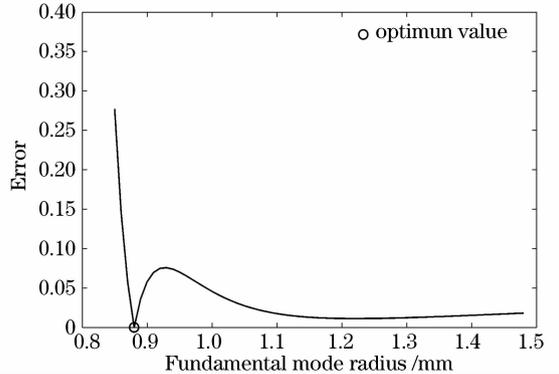


图 2 激光场强度相对空间分布计算误差

Fig. 2 Calculation error of relative intensity distribution of laser field

从图 2 可以看出,误差随着基模光斑半径增加而先减小后增加,经计算基模光斑半径为 0.88 mm 时误差最小,相应的各阶横模强度归一化分布函数为最优解,由最优解计算出各阶横模比例如表 1 所示。从表 1 可以看出各阶横模比例的计算结果和给定值非常吻合,表明这种测量激光束横模结构的方法是准确、可行的。

## 5 实验应用

设计相关实验,对一款调Q激光二极管(LD)抽运固体激光器(DPL)的激光束横模结构进行分析计算,再以计算出的横模比例为基础,理论上重构出激光束在腔外不同位置处的强度分布曲线,并通过和实验测量值的比较,来检验重构激光束是否与实际光束空间传输过程一致,从而对激光束横模结构计算结果进行检验。

### 5.1 实验装置和测量数据

实验装置如图3所示,实验中抽运光功率为13 W,输出镜面为平面镜,透射率为13.4%。

用图3所示装置测量离输出镜面距离为40 cm

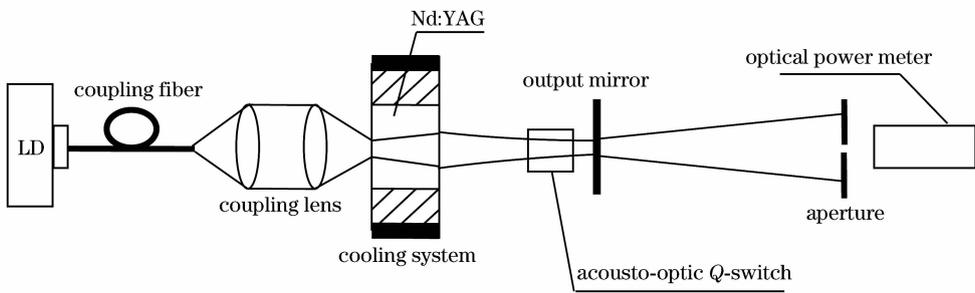


图3 测量横模结构的实验装置

Fig. 3 Experimental setup of measuring transverse mode configuration

表2  $d=40$  cm处单脉冲平均功率测量数据

Table 2 Measuring data of average power in a single pulse at  $d=40$  cm

Test position /mm	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
Average light power /mW	297	275	210	128	66	34
Intensity /( $\text{mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	94.59	87.58	66.88	40.76	21.02	10.83

表3  $d=80$  cm处单脉冲平均功率测量数据

Table 3 Measuring data of average power in a single pulse at  $d=80$  cm

Test position /mm	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
Average light power /mW	128	120	104	82	60	42
Intensity /( $\text{mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	40.76	38.22	33.12	26.11	19.11	13.38

### 5.2 激光横模结构计算

根据 $d=40$  cm处的激光场强度相对值计算横模比例。首先,取 $d=40$  cm处基模光斑半径为 $0.4\sim 0.8$  mm,根据(12)式求出(11)式的系数矩阵,同时由表1中激光场强度值和总脉冲平均功率求出(11)式右端激光场强度相对值 $B_1^0, B_2^0, \dots, B_M^0$ ,求解方程组(11)即可得到相应各阶横模比例 $k_1, k_2, \dots, k_N$ ,然后将 $k_1, k_2, \dots, k_N$ 和各阶横模强度归一化分布代入(14)式计算出测量位置处激光场强度相对值 $B_1, B_2, \dots, B_M$ ,得到 $B_1, B_2, \dots, B_M$ 和测量值 $B_1^0, B_2^0, \dots, B_M^0$ 之间误差随基模光斑半径变化曲线,如图4所示。计算结果表明基模光斑半径为 $0.68$  mm时误差最小,此时所确定的激光横模强度归一化分

和 $80$  cm处的不同位置处的平均功率及总的平均功率。记光斑中心位置为 $r=0$ 处,初步假定实验中激光横模模式数目 $N$ 不超过3,这样在测量单脉冲能量空间分布时在每一平面内均选取3个或者多于3个的位置进行测量即可获得足够的的数据。实际测量了6个位置,同时认为小孔内光强是均匀的,将测量到的6个位置处的平均功率除以小孔面积即可得到相应光强值。测量数据和处理得到不同位置处的光强值如表2,3所示,同时测量到的总脉冲平均功率为 $544$  mW。取光强下降到峰值 $e^{-1}$ 时的位置为光斑半径,测量到在 $d=40$  cm处和 $d=80$  cm处光斑半径分别为 $0.65$  mm和 $0.91$  mm。

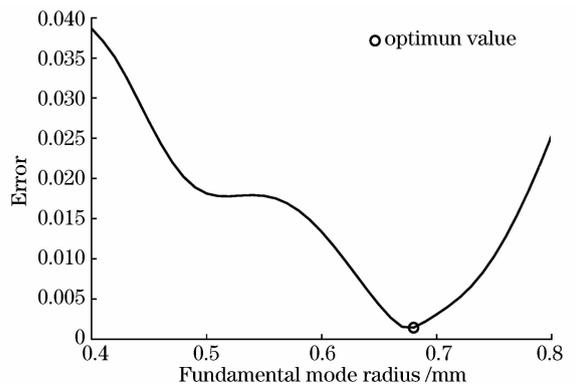


图4 腔外40 cm处激光场强度相对分布计算误差  
Fig. 4 Calculation error of spatial relative intensity distribution of laser field intensity at  $d=40$  cm

布函数即为最优解；其次，由最优解计算出横模比例如表 4 所示。可以看出， $TEM_{02}$  模所占比例仅为 0.03，可以忽略，这说明比更高阶模式所占比例更小，也可以忽略，同时也表明模式数  $N$  不超过 3 的假设是正确的。

表 4 由  $d=40$  cm 处测量数据计算得到的各阶横模比例

Table 4 Transverse mode proportion calculated by measuring data at  $d=40$  cm

Transverse mode	$TEM_{00}$	$TEM_{01}$	$TEM_{02}$
Proportion	0.72	0.25	0.03

由计算出的各阶横模比例和各阶激光横模强度归一化分布函数最优解，根据(14)式重构出  $d=40$  cm处激光场强度相对分布曲线如图 5 所示。此时计算得到峰值相对误差为 0.02%，光斑半径为 0.64 mm，与测量值之间相对误差为 1.54%。

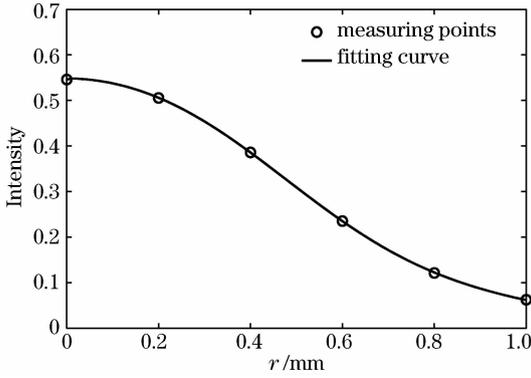


图 5  $d=40$  cm 处激光场强度相对分布曲线

Fig. 5 Spatial relative intensity distribution curve of laser field at  $d=40$  cm

### 5.3 激光束横模结构计算结果验证

由(14)式可知，以表 4 中计算得到的横模比例为基础，重构腔外  $d=80$  cm处的激光场强度空间分布曲线，还需求出腔外  $d=80$  cm处各阶激光腔横模强度归一化分布函数。

记腔外  $d=40$  cm 处光斑半径为  $w(z_1)$ ，腔外  $d=80$  cm处光斑半径为  $w(z_2)$ ，根据光斑半径表达式<sup>[17]</sup>

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{f}\right)^2}, \quad (15)$$

可以得到

$$w(z_2) = w(z_1) \sqrt{\frac{z_2^2 + f^2}{z_1^2 + f^2}}. \quad (16)$$

故给定高斯光束的共焦参数  $f$ ，可以由  $w(z_1)$  求出  $w(z_2)$ ，从而根据(12)式求出  $d=80$  cm处各阶激光横模强度归一化分布函数。

以  $w(z_1)=0.68$  mm 和横模比例为基础，取高

斯光束共焦参数为  $0\sim 0.5$  m，根据(14)式计算测量位置处激光场强度相对值  $B_1, B_2, \dots, B_M$  和测量值  $B_1^0, B_2^0, \dots, B_M^0$  之间误差随高斯光束共焦参数变化曲线如图 6 所示。计算得到高斯光束共焦参数为 0.17 m时，误差最小，并将其作为最佳高斯光束共焦参数，相应的各阶激光腔横模强度归一化分布函数为最优解。

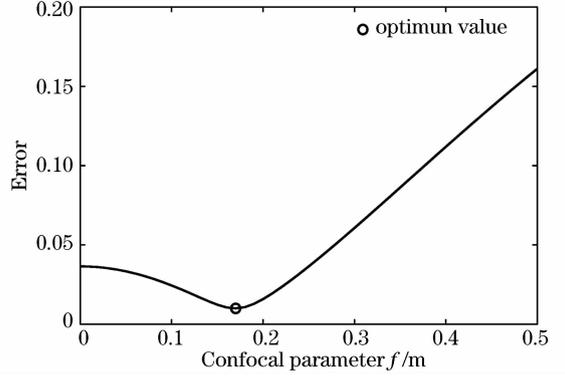


图 6  $d=80$  cm 处激光场强度相对分布计算误差  
Fig. 6 Calculation error of spatial relative intensity distribution curve of laser field at  $d=80$  cm

同样，根据横模比例和各阶激光腔横模强度归一化分布函数的最优解，重构出  $d=80$  cm处激光场强度空间分布曲线，如图 7 所示。可以看出重构出的激光场强度空间分布曲线与实验测量值的偏离程度很小，经计算得到峰值相对误差为 0.25%，光斑半径为 0.89 mm，与测量值之间相对误差为 2.20%，同时根据  $d=40$  cm处和  $d=80$  cm处激光束光斑半径可计算出重构激光束与实际光束间远场发散角的相对误差为 3.85%。重构激光束与实际光束空间传输过程基本一致，以此验证了激光束横模结构分析结果是可靠的。

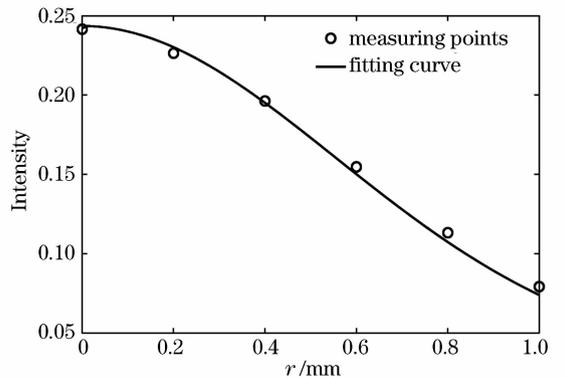


图 7  $d=80$  cm 处激光场强度相对分布曲线  
Fig. 7 Spatial relative intensity distribution curve of laser field at  $d=80$  cm

## 6 结 论

分析了根据激光场强度相对分布测量激光束横模结构的理论方法,以脉冲激光器为例设计了测量激光束横模结构的实验方法。采用此法对给定激光场强度相对分布曲线的横模结构进行计算,得到各阶横模比例的计算值和给定值相等。设计了相关实验,对实际的一款调 Q DPL 的激光场强度相对分布进行了测量,在不需要谐振腔参数的情况下,计算出各阶横模比例,其中  $TEM_{00}$  占 72%,  $TEM_{01}$  模占 25%,  $TEM_{02}$  模占 3%, 并重构出激光束在  $d=40$  cm 处和  $d=80$  cm 处的激光场强度相对空间分布曲线,计算结果和实际测量值基本吻合,其中峰值相对误差分别为 0.02% 和 0.25%, 光斑半径相对误差分别为 1.54% 和 2.20%, 重构激光束与实际光束间远场发散角相对误差为 3.85%, 检验了各阶横模比例计算结果的可靠性。为研究激光束横模结构提出了一种新的方法,并且在实际应用中操作简单,对研究激光器的性能和激光器模式控制有重要价值;同时提高激光场强度相对分布的测量精度和速度可以实现对激光场横模结构的实时高精度测量。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7):1643~1653  
冯国英,周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7):1643~1653
- 2 Yang Huanxiong, Zhao Daomu, Lu Xuanhui *et al.*. Several viewpoints related to the beam quality factor  $M^2$  [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(8):709~714  
杨焕雄,赵道木,陆璇辉等. 关于光束质量因子  $M^2$  的几点看法[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(8):709~714
- 3 Tian Yinghua, Ye Yidong, Xiang Rujian *et al.*. Evaluation of uncertainty in beam quality measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7):1076~1078  
田英华,叶一东,向汝建等. 光束质量因子测量的不确定度分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(7):1076~1078
- 4 H. L. Offerhaus, C. B. Edwards, W. J. Witteman. Single shot beam quality ( $M^2$ ) measurement using a spatial Fourier transform of the near field [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **151**(1-3):65~68
- 5 R. W. Lambert, R. Cortés-Martínez, A. J. Waddie *et al.*.

- Compact optical system for pulse-to-pulse laser beam quality measurement and applications in laser machining [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26):5037~5046
- 6 P. Weßels, C. Fallnich. Highly sensitive beam quality measurements on large-mode-area fiber amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(25):3346~3351
- 7 J. V. Sheldakova, A. V. Kudryashov, V. Y. Zavalova *et al.*. Beam quality measurements with Shack-Hartmann wavefront sensor and  $M^2$ -sensor: comparison of two methods [C]. *SPIE*, 2007, **6452**:645207
- 8 Hongru Yang, Lei Wu, Xuexin Wang *et al.*. Evaluation of beam quality for high-power lasers [C]. *SPIE*, 2007, **6823**:682316
- 9 J. A. Russell, D. P. Pacheco, H. R. Aldag *et al.*. Beam-quality measurements on solid-state dye lasers using nonconfocal unstable resonators [C]. *SPIE*, 2001, **4267**:36~45
- 10 K. C. Jorge, R. Riva, N. A. S. Rodrigues *et al.*. Real-time measurement of laser beam quality factor ( $M^2$ ) by imaging transverse scattered light [C]. *SPIE*, 2007, **6452**:645215
- 11 Fang Tao, Ye Xin, Wang Zhimin *et al.*. Real-time measurement of beam quality factor  $M^2$  based on diffraction gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):650~654  
房滔,叶忻,王志敏等. 一种基于衍射光栅光束质量  $M^2$  因子的实时检测技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):650~654
- 12 Guo Ping, Huang Ningning. Analysis of transverse modes in a laser beam [J]. *Laser & Infrared*, 2000, **30**(1):22~24  
郭屏,黄宁宁. 激光束的横模分析[J]. *激光与红外*, 2000, **30**(1):22~24
- 13 Shen Jinhua, Wang Shiyu, Guo Zhen *et al.*. Nonlinear network of measuring transverse modes in a laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):555~558  
沈金华,王石语,过振等. 一种测量激光束横模结构的非线性网络[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):555~558
- 14 Yu Yong'ai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):255~258  
于永爱,张玲玲,唐前进等. 激光束质量实时测量技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):255~258
- 15 Ma Haotong, Xi Fengjie, Zhou Pu *et al.*. Measurement of  $M^2$  factor of 1064 nm pulsed laser based on crossed defocus gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3):821~826  
马浩统,习峰杰,周朴等. 基于正交散焦光栅的 1064 nm 脉冲激光  $M^2$  因子测量[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3):821~826
- 16 Chen Peifeng, Qiu Junlin. Analysis of spatial coherence between laser modes [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1995, **12**(2):133~136  
陈培锋,丘军林. 激光模式间的空间相干性分析[J]. *量子电子学*, 1995, **12**(2):133~136
- 17 W. Koehler. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl.. Beijing: Science Press, 2002. 171~180  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥译. 北京:科学出版社,2002. 171~180