

文章编号:1004-4213(2010)11-2040-5

# 根据激光单脉冲能量空间分布测量激光横模结构的方法

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,西安 710071)

**摘 要:**针对脉冲激光器,提出了一种根据激光单脉冲能量空间分布测量激光横模结构的方法,构造了相应算法,并通过理论和实验验证了该方法.通过对调 Q 二极管泵浦固体激光器的调 Q 过程进行数值模拟,计算出单脉冲能量空间分布曲线和各阶横模比例,同时根据单脉冲能量空间分布曲线上一些离散点计算出各阶横模比例,且与调 Q 过程数值模拟的直接计算结果相等.同时在实验中根据测量出的单脉冲能量相对值,计算出各阶横模比例,拟合出腔外不同距离处的单脉冲能量空间分布曲线.对腔外不同距离处单脉冲能量相对值和相应拟合曲线进行比较,发现测量值和拟合曲线吻合.

**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/gzxb20103911.2040

## 0 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课题.激光光束质量有很多评价参量,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、光束参量乘积、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的文献已有很多<sup>[4-15]</sup>,测量技术在实现实时高精度测量方向有了很大发展,但针对脉冲激光器的实时高精度测量的研究还很少.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研究,但是实际操作都比较复杂,本文提出一种针对脉冲激光器的通过单脉冲能量空间分布来测量激光横模结构的方法,操作方法简单、准确度高,更易于用于激光横模结构测量.

## 1 理论基础

通常激光器都不是工作在单一模式下的,实际输出激光是由基模和多个高阶模组成的混合模.在实际应用中测量各阶模式在混合模中所占比例成为

人们极其关心的一个问题.这里为激光横模结构测量提出一种准确度高、操作简单的方法.

对于脉冲激光器,用  $TEM_{mn}$  表示其激光腔模式, $m$  和  $n$  表示横模序数.为了和后面模拟计算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  $Q$  处激光强度.则  $I(r, \varphi, z, t)$  反映了激光脉冲形状的空间分布,可以表示为

$$I(r, \varphi, z, t) = \sum_{i=1}^N p_i(t) \cdot s_i(r, \varphi, z) \quad (1)$$

式中  $p_i(t)$  表示  $t$  时刻激光脉冲中  $TEM_{mn}$  模所贡献的功率,  $N$  表示谐振腔内参与振荡的激光腔横模模式总数,  $s_i(r, \varphi, z)$  为  $TEM_{mn}$  模的强度归一化分布,其表达式为

$$s_i(r, \varphi, z) = c_{mn} E_{mn}(r, \varphi, z) \cdot E_{mn}^*(r, \varphi, z) \quad (2)$$

式中  $E_{mn}(r, \varphi, z)$  表示  $TEM_{mn}$  模在  $Q$  点处的电场强度,  $c_{mn}$  为归一化系数,满足

$$c_{mn} \cdot \iint_s E_{mn}(r, \varphi, z) \cdot E_{mn}^*(r, \varphi, z) ds = 1 \quad (3)$$

则  $Q$  点处激光单脉冲能量  $\epsilon_i(r, \varphi, z)$  为

$$\epsilon(r, \varphi, z) = \int_0^T I(r, \varphi, z, t) dt \quad (4)$$

$T$  为输出激光脉冲周期,把式(1)和式(2)代入式(4)得到

$$\begin{aligned} \epsilon(r, \varphi, z) &= \int_0^T \sum_{i=1}^N p_i(t) \cdot s_i(r, \varphi, z) dt = \\ &= \epsilon \cdot \sum_{i=1}^N \left[ \left( \int_0^T p_i(t) dt \right) / \epsilon \right] \cdot s_i(r, \varphi, z) = \end{aligned}$$

$$\epsilon \cdot \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot s_i(r, \varphi, z) \quad (5)$$

式中  $\epsilon$  为激光单脉冲能量,  $\omega_i$  为 TEM<sub>*m*</sub> 模在激光单脉冲能量中所占比例, 它们的相应表达式为

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

$$\omega_i = \epsilon_i / \epsilon = \left[ \int_0^T p_i(t) dt \right] / \epsilon \quad (7)$$

整理式(5)可以得到

$$\sum_{i=1}^N \omega_i \cdot s_i(r, \varphi, z) = [\epsilon(r, \varphi, z)] / \epsilon \quad (8)$$

式中右端表达式表示激光单脉冲能量空间分布, 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, 对于谐振腔结构已经确定的脉冲激光器,  $s_i(r, \varphi, z)$  是可以根据谐振腔理论计算得到的, 如果测量出各激光横模模式所占比例就可以由式(8)拟合出激光单脉冲能量空间分布曲线; 反之若已知激光单脉冲能量的空间分布, 就可以求解出各激光腔横模模式所占比例  $\omega_i$ , 得到激光横模结构.

式(8)即为根据激光单脉冲能量空间分布测量激光横模结构的理论依据. 可以首先测量出激光单脉冲能量空间分布, 再根据式(8)建立相应线性方程组即可求解出各阶横模所占比例.

## 2 算法构造及计算机仿真分析

### 2.1 算法构造

对于各阶横模结构已知的脉冲激光器, 设激光腔内运转横模个数为  $N$ ,  $B(r, \varphi, z_0)$  表示腔外平面  $z = z_0$  处的单脉冲能量空间分布, 选取平面  $z = z_0$  内  $M$  个点,  $B_i$  表示其中第  $i$  个点处的单脉冲能量相对值,  $A_{ij}$  表示在第  $i$  个点处第  $j$  个横模的强度归一化分布值,  $x_i$  表示第  $i$  个横模所占比例. 由于平面  $z = z_0$  内  $M$  个点的单脉冲能量相对值均满足式(8), 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

$$\begin{aligned} A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + \cdots + A_{1N}x_N &= B_1 \\ A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + \cdots + A_{2N}x_N &= B_2 \\ &\dots &&\dots \end{aligned} \quad (9)$$

$$A_{M1}x_1 + A_{M2}x_2 + \cdots + A_{MN}x_N = B_M$$

式中腔内横模模式个数  $N$  可以根据经验估算确定其取值, 而  $M$  的取值应不小于横模模式个数. 根据谐振腔理论计算出谐振腔内各阶横模结构以计算出方程组(9)的系数矩阵, 如果给定平面  $z = z_0$  处的  $M$  个点的单脉冲能量相对值  $B_1, B_2, \dots, B_M$  即可用计算机求解出各阶横模比例.

### 2.2 调 Q 脉冲激光器的仿真计算和横模结构检验

以声光调 Q 二极管泵浦固体激光器 (Diode Pumped Solid State Laser, DPL) 为例, 对调 Q 过程进行数值模拟, 计算出调 Q DPL 的单脉冲能量空间分布, 以及各阶横模比例, 再由单脉冲能量空间分布, 根据前面构造的算法, 求解出各阶横模比例. 将它们和通过对调 Q 过程数值模拟直接得到的各阶横模比例进行比较, 以检验所提出计算各阶横模比例方法的可行性.

#### 2.2.1 调 Q 脉冲激光器的仿真计算模型

将调 Q 过程分为两个阶段, 分别为能量存储过程和能量释放过程. 对四能级系统 Nd:YAG 激光器, 将速率方程和光场运动方程相结合, 可以得到端面抽运 DPL 中四能级系统激光器在能量存储过程的上能级粒子数变化表达式和释放能量阶段的速率方程分别为<sup>[16]</sup>

$$M(r, \varphi, t) = P(r, \varphi) \tau_f (1 - \exp(-t/\tau_f)) \quad (10)$$

$$\frac{dM(r, \varphi, t)}{dt} = -\frac{c\sigma M(r, \varphi, t)}{n_g} S(r, \varphi, 0, t) \quad (11)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{c\sigma}{n_g} \int_{z=0} M(r, \varphi, t) \delta(z) S(r, \varphi, 0, t) \cdot$$

$$dV - \frac{c\delta_0}{2n_g l} N(t) \quad (12)$$

式中  $\delta(z)$  为  $\delta$  函数, 满足

$$\delta(z) = \begin{cases} \infty & z=0 \\ 0 & z \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$M(r, \varphi, t)$  表示从端面观察到的反转粒子数的面密度,  $P(r, \varphi)$  表示单位时间抽运光向上能级抽运的粒子数密度,  $\tau_f$  表示激光上能级荧光寿命,  $c$  表示真空中的光速,  $\sigma$  表示受激辐射截面,  $S(r, \varphi, z)$  表示振荡光子密度,  $n_g$  表示增益介质折射率,  $\delta_0$  表示振荡光在腔内往返损耗率,  $N(t)$  表示腔内振荡光子总数,  $l$  表示增益介质长度.

根据式(11)~(13)即可对调 Q DPL 的调 Q 过程进行数值模拟, 从而计算出单脉冲能量空间分布和各阶模式所占比例.

#### 2.2.2 仿真计算结果及横模结构检验

根据对调 Q DPL 的调 Q 过程进行数值模拟, 采用四能级 Nd:YAG 晶体做增益介质, 取晶体尺寸为  $\phi 3 \times 10 \text{ mm}^2$ , 晶体两端打磨成平面, 用二极管经光纤耦合之后端面抽运晶体的一端, 由于晶体的热效应可以用热透镜进行等效<sup>[17]</sup>, 则可以把抽运光抽运的晶体的那一端等效为谐振腔的输入镜面, 输出镜为平面镜, 透过率为 13.4%, 则增益介质端面和输出镜构成了平凹腔. 腔长取为 6.5 cm,

声光调 Q 开关置于增益介质和输出镜之间,调 Q 频率为 10 kHz.

取抽运光功率为 13 W,半径为 0.5 mm,模拟计算离输出镜面 40 cm 处单脉冲能量空间分布以及各阶横模比例,并选取单脉冲能量空间分布曲线上的 4 个点构成式(9)所示的方程组求解各阶横模比例,并与调 Q 过程模拟计算的比例进行比较,如图 1 和图 2.

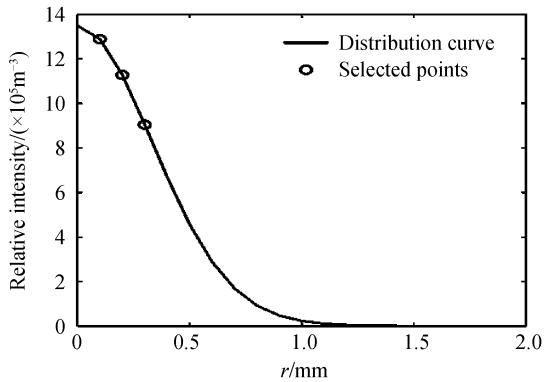


图 1 激光单脉冲能量空间分布曲线

Fig. 1 Spatial distribution curve of the single pulse energy

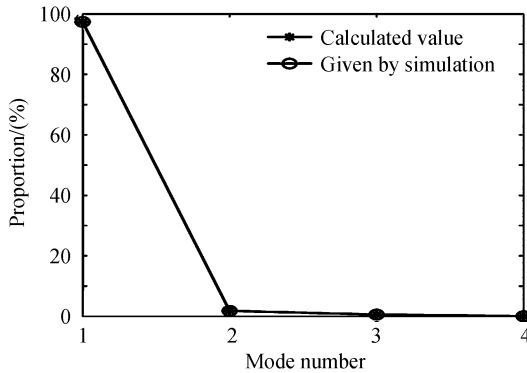


图 2 两种方法计算出各阶横模比例比较

Fig. 2 Comparison of transverse mode proportion in two methods

图 1 给出了根据四能级速率方程模拟计算出的激光单脉冲能量空间分布曲线.图 2 横轴用正整数表示激光横模,依次为  $TEM_{00}$ 、 $TEM_{01}$ 、 $TEM_{02}$ 、 $TEM_{03}$  等.模拟计算结果看出只有少数低阶模运转,取  $TEM_{00}$ 、 $TEM_{01}$ 、 $TEM_{02}$ 、 $TEM_{03}$  为腔内工作的激光腔模式已足够,故只选取了激光单脉冲能量空间分布曲线上的 4 个点作为构成线性方程组的数据点,如图 1.根据式(9)构造线性方程组可以求解出这四个横模所占比例.图 2 给出了根据这 4 个数据点计算出的各阶横模所占比例,以及根据四能级速率方程模拟计算出的比例.从图 2 可以看出通过对调 Q 过程数值模拟直接计算出的各阶横模所占比例和由单脉冲能量空间分布计算出的数据非常吻合,从而通过数值模拟计算验证了这种测量激光横模结构方法的可行性.

### 3 实验结果及分析

为了进一步验证这种方法的可行性,设计了相关实验对实际调 Q DPL 腔外不同距离处单脉冲能量空间分布进行测量,所采用实验装置如图 3.

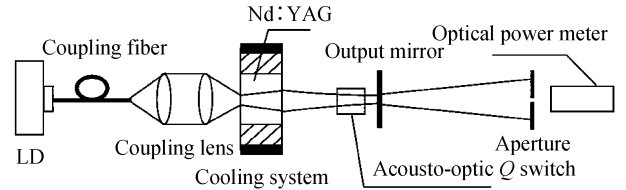


图 3 测量横模结构的实验装置

Fig. 3 Experimental setup of the measuring transverse mode

实验中激光器的相关参量同前文理论部分,用图 3 所示装置测量离输出镜面距离为 40 cm 和 80 cm 处的不同位置处的平均功率及总的平均功率.理论上实验中所用小孔直径越小越好,但限于加工条件这里采用的小孔直径为 1 mm.测量中将小孔以 0.2 mm 的间距进行由左向右平移测量,移动过程中通过小孔的功率值的变化,是由右面移进小孔区域的功率减去由左面移出小孔的功率.实际上左面移出和右面移进小孔的面积应当是相等的,这样就获得了间距近似为 1 mm 的两个等面积上的功率的差值.作为近似处理,本文忽略这两个面积形状的差别,称每一个面积为小面积元.利用连续的等间隔平移测量,便获得了一系列等大小面积元上的功率的差值.考虑激光光斑外的面积元上的功率为 0,可以最终确定这个系列中每个面积元上的功率值.

记光斑中心位置为  $r=0$ ,初步假定本实验中激光横模模式数目不超过 5,这样在测量单脉冲能量空间分布时在每一平面内均选取 5 或 6 个位置进行测量即可获得足够的测量数据.实际测量了 6 个位置,按照前面所述方法得到的测量数据见表 1 和表 2.离输出镜面距离  $d=40$  cm 处测量到的总脉冲平均功率为 544 mW,离输出镜面距离  $d=80$  cm 处测量到的总脉冲平均功率为 530 mW.并由测量数据绘制出单脉冲能量空间分布,如图 4.

表 1  $d=40$  cm 处单脉冲平均功率测量数据

Table 1 Measuring data of average single pulse power at  $d=40$  cm

Test position/mm	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Average light power/mW	297	275	210	128	66	34

表 2  $d=80$  cm 处单脉冲平均功率测量数据

Table 2 Measuring data of average single pulse power at  $d=80$  cm

Test position/mm	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Average light power/mW	128	120	104	82	60	42

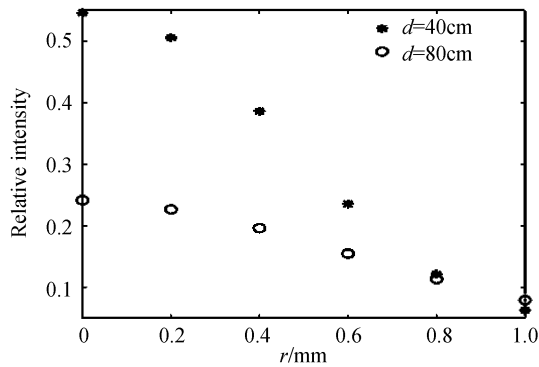


图4 实验测量单脉冲能量空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of the single pulse energy in experiment

根据  $d=40$  cm 处的 6 个单脉冲能量相对值, 计算出 5 个横模式分别所占比例, 将各阶模式比例和各阶模式的空间分布函数代入式(8)可以拟合出  $d=80$  cm 处的单脉冲能量空间分布曲线. 如果测量得到的  $d=80$  cm 处的单脉冲能量相对值和这一曲线相吻合, 则可以验证由单脉冲能量空间分布测量横模结构的方法是可行的.

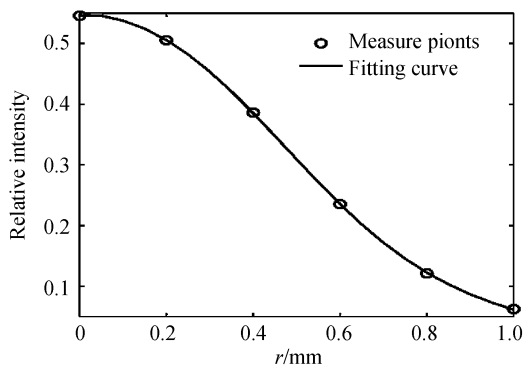
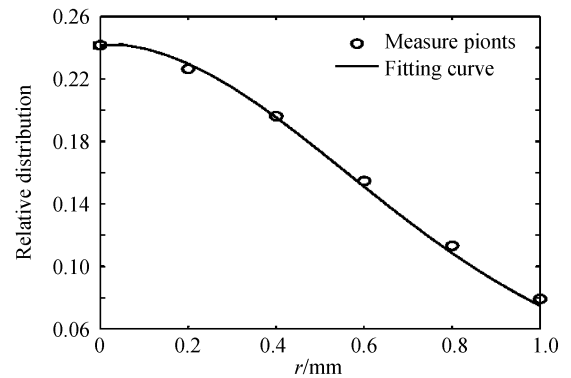
由  $d=40$  cm 处的测量值构造式(9)所示的线性方程组, 计算出各阶模式所占比例见表 3. 可以看出, 对横模所占比例值取小数点后两位时,  $TEM_{03}$  和  $TEM_{04}$  所占比例均约为 0.00, 可以忽略. 这说明比更高阶模式所占比例更小, 也可以忽略, 同时也表明前面假定模式数不超过 5 是正确的.

表 3 由  $d=40$  cm 处测量数据计算得到的各阶横模比例Table 3 Transverse mode proportion calculated by measuring data at  $d=40$  cm

Transverse mode	$TEM_{00}$	$TEM_{01}$	$TEM_{02}$	$TEM_{03}$	$TEM_{04}$
Proportion	0.73	0.23	0.04	0.00	0.00

图 5(a) 和 (b) 为根据式(8)分别拟合出的离输出镜面距离  $d=40$  cm 和  $d=80$  cm 处的单脉冲能量空间分布曲线.

从图 5(b) 看出, 实验测量的  $d=80$  cm 处的 6

(a)  $d=40$  cm(b)  $d=80$  cm图 5  $d=40$  cm 和  $d=80$  cm 处单脉冲能量空间分布曲线  
Fig. 5 Spatial distribution curves of the single pulse energy at  $d=40$  cm and  $d=80$  cm

个单脉冲能量相对值点与计算出的单脉冲能量空间分布曲线的偏离程度很小.

## 4 结论

针对脉冲激光器, 提出了一种根据激光单脉冲能量空间分布测量激光横模结构的方法, 构造了相应算法. 以调 Q DPL 为例通过数值模拟调 Q 过程计算出单脉冲能量空间分布曲线和各阶横模比例, 然后选取单脉冲能量空间分布曲线上一些离散点计算出各阶横模比例, 与调 Q 过程数值模拟计算出的比例相等, 初步验证了这一方法的可行性. 对实际调 Q DPL 的单脉冲能量空间分布进行了测量, 根据较近距离处的测量值计算出了各阶横模比例, 利用这一比例和各阶模式分布函数计算出较远距离处单脉冲能量空间分布曲线, 这一曲线和实际测量值基本吻合, 进一步在实验中证明了这一方法是可行的. 文中为研究激光横模结构提出了一种新的方法, 实际应用中操作简单, 根据有限的单脉冲能量空间分布值即可测量出相应激光横模结构, 这对于研究脉冲激光器的性能和激光器模式控制有重要的价值; 同时提高激光单脉冲能量空间分布的测量准确度和速度可以实现对激光单脉冲横模结构的实时高准确度测量.

### 参考文献

- [1] FENG Guo-ying, ZHOU Shou-huan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(7): 1643-1652.  
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): 1643-1652.
- [2] YANG Huan-xiong, ZHAO Dao-mu, LU Xuan-hui, et al. Several viewpoints related to the beam quality factor  $M_2$ [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **24**(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, **24**(8): 709-714.

- [3] TIAN Ying-hua, YE Yi-dong, XIANG Ru-jian, *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] OFFERHAUS H L, EDWARDS C B, WITTEMAN W J. 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] LAMBERT R W, CORTES-MARTINEZ R, WADDLE A J, *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] WEßELS P, FALLNICH C. Highly sensitive beam quality measurements on large-mode-area fiber amplifiers [J]. *Opt Express*, 2003, **11**(25): 3346-3351.
- [7] SHELDAKOVA J V, KUDRYASHOV A V, ZAVALOVA V Y, *et al.* Beam quality measurements with Shack-Hartmann wavefront sensor and  $M_2$ -sensor; comparison of two methods [C]. *SPIE*, 2007, **6452**: 645207.
- [8] YANG Hong-ru, WU Lei, WANG Xue-xin, *et al.* Evaluation of beam quality for high-power lasers[C]. *SPIE*, 2007, **6823**: 682316.
- [9] RUSSELL J A, PACHECO D P, ALDAG H R, *et al.* Beam-quality measurements on solid-state dye lasers using nonconfocal unstable resonators[C]. *SPIE*, 2001, **4267**: 36-45.
- [10] JORGE K C, RIVA R, RODRIGUES N A S, *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 Zhi-min, *et al.* Real-time measurement of beam quality factor  $M_2$  based on diffraction gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(5): 650-654.  
房滔,叶昕,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 Ning-ning. 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 Jin-hua, WANG Shi-yu, GUO Zhen, *et al.* Nonlinear network of measuring transverse modes in a laser beam[J]. *Chinese Journal of 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 Ling-ling, TANG Qian-jin, *et al.* Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese Journal of 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 Hao-tong, XI Feng-jie, ZHOU Pu, *et al.* Measurement of  $M_2$  factor of 1 064 nm pulsed laser based on crossed defocus gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3):821-826.  
马浩统,习锋杰,周朴,等.基于正交散焦光栅的 1 064 nm 脉冲激光  $M_2$  因子测量[J].*光学学报*,2010,**30**(3):821-826.
- [16] WANG Shi-yu, GUO Zhen, FU Jun-mei, *et al.* Effect of the pump Light on the beam quality of the diode pumped laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9):2995-3003.  
王石语,过振,傅君媚,等.抽运光分布对二极管抽运激光器振荡光光束质量的影响[J].*物理学报*,2004,**53**(9):2995-3003.
- [17] YANG Yong-ming, WEN Jian-guo, WANG Shi-yu, *et al.* The thermal lens focus of the end-pumped Nd : YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1769-1772.  
杨永明,文建国,王石语,等.LD 端面泵浦 Nd : YAG 激光器中的热透镜焦距[J].*光子学报*,2005,**34**(12):1769-1772.

## Measuring Method of Transverse Mode in a Laser Beam Based on Spatial Distribution of Single Pulse Energy

ZHOU Na, WANG Shi-yu, GUO Zhen, CAI De-fang, WEN Jian-guo, LI Bing-bin  
(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A measuring method of transverse mode in a laser beam is presented, which is based on the spatial distribution of single pulse energy in a pulsed laser. An algorithm for this method is designed and proved to be reliable in theory and experiments. The spatial distribution curve of single pulse energy is derived by numerical simulation for Q-switched diode pumped solid state laser. The transverse mode proportion calculated by this method is exactly equal to those calculated directly by numerical simulation. An experiment is also conducted to measure transverse mode proportion by using this new measuring method. Spatial distribution of single pulse energy is obtained by testing single pulse energy at different positions in different planes. The transverse mode proportion in Q-switched diode pumped solid state laser is calculated by forming a system of equations with those testing data which is consonant with the spatial distribution curves of single pulse energy fitted by the calculated proportion and transverse mode distribution in those different planes.

**Key words:** Laser technique; Measurement; Laser beam; Transverse mode; Pulsed laser



**ZHOU Na** was born in 1985. She received her B. E. degree in optical information science and technology from Xidian University. Currently, she is working toward her M. E. degree in optical engineering at Xidian University.