

文章编号: 0253-2239(2010)03-0802-06

全固态 Nd:YAG 激光器热效应及 输出光束波前像差分析

张 翔 苏礼坤 蔡 青

(成都信息工程学院光电技术系, 四川 成都 610225)

摘要 高功率全固态激光器的诸多腔内扰动因素均会直接影响到激光输出功率和光束质量。首先采用传输矩阵方法简要讨论了在稳定腔情形下热透镜焦距与本征模式光斑尺寸的关系。进一步采用 Hartmann-Shack 波前传感器和模式法波前重构,对二极管抽运全固态声光调 Q 激光器输出倍频光束质量进行了分析,得到前 35 阶 Zernike 像差系数、波前峰谷值和均方根等畸变参量,计算还可得到点扩散函数分布和环围能量曲线等,从而全面了解输出光束质量和动态像差特性。分析表明输出倍频光的波前 Zernike 像差主要集中在前 15 阶,由于晶体热效应及腔内其它扰动因素的影响,较显著波前像差有离焦系数 Z_3 、低阶像散 Z_4 和 Z_5 ,以及球差 Z_{10} 等。

关键词 激光技术; 激光二极管抽运 YAG 激光器; 热效应; Hartmann-Shack 波前传感器; 波前重构; Zernike 像差
中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0802

Analysis of Thermal Effect and Experimental Test of Beam Wavefront Aberration in All Solid-State Nd:YAG Laser

Zhang Xiang Su Likun Cai Qing

(Department of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information
Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract Many factors of intracavity perturbation degrades the output power and beam quality for high power laser diode pumped solid laser. Firstly, the relation between the focal length of thermal lens and the beam spot size is analyzed by means of transmission matrix optics. Experiment on output beam quality of a LD pumped acousto-optic Q-switched laser has been also performed by adopting Hartmann-Shack wavefront sensor and mode method of wavefront reconstruction theory. Using this method, the peak-to-valley value and root mean square values of the aberration wavefront, the frontal 35-order Zernike aberrations can be acquired, and Strehl ratio curve of the output beam and the distribution of circle energy can also be obtained by calculation, so the mode properties can be fully understood. Experimental results show that the beam wavefront aberration is mainly concentrated in the frontal 15 orders of Zernike aberration, mainly including the defocus Z_3 , the low-order astigmatism Z_4 and Z_5 , and the spherical aberration Z_{10} because of crystal thermal effect.

Key words laser technique; laser diode pumped YAG solid laser; crystal thermal effect; Hartmann-Shack wavefront sensor; phase reconstruction; Zernike aberration

1 引 言

全固态激光器(DPSSL)具有转换效率高、器件结构紧凑、输出能量高和光束质量好等优点,因而在激光技术中获得了广泛应用^[1,2]。但其出光过程中的各类热效应问题如半导体抽运组件产生的热效

应、增益介质热效应以及高功率频率转换中非线性晶体热效应问题等,都会直接影响到激光输出功率和光束质量^[3~7]。本文首先采用传输矩阵理论简要分析了稳定腔情形下晶体热透镜焦距与腔内光斑尺寸的关系,进一步采用 Hartmann-Shack (H-S)波前

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-09

作者简介: 张 翔(1976—),男,博士,副教授,主要从事激光技术和光电探测方面的研究。

E-mail: zhanghk23@yahoo.com.cn

传感方法和模式法波前重构,对二极管抽运全固态激光器输出倍频光束波前相位特性进行了分析,实验表明采用该方法可以较全面了解输出光束质量及动态波前像差变化特性。

2 基本理论

2.1 热透镜效应对稳定腔的影响

相关分析表明固体工作物质一般产生热正透镜效应,设图 1 稳定腔内热透镜焦距为 f ,距两反射镜分别为 d_1 和 d_2 ,谐振腔镜曲率半径分别为 R_1 和 R_2 。则腔内传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -f^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - d_2/f & b \\ -1/f & 1 - d_1/f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

而谐振腔 G 参量表达为

$$\begin{cases} G_1 = a - b/R_1 = 1 - d_2/f - b/R_1, \\ G_2 = d - b/R_2 = 1 - d_1/f - b/R_2, \\ b = d_1 + d_2 - d_1 d_2 / f, \end{cases} \quad (2)$$

对稳定腔,其稳定条件应满足

$$0 < G_1 G_2 = (1 - d_2/f - b/R_1) \times (1 - d_1/f - b/R_2) < 1, \quad (3)$$

进一步推导可得两镜面上的光斑尺寸和光腰尺寸分别为

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \left(\frac{\lambda_0 b}{\pi} \right)^{1/2} \left[\frac{G_2}{G_1(1 - G_1 G_2)} \right]^{1/4}, \\ \omega_2 &= \left(\frac{\lambda_0 b}{\pi} \right)^{1/2} \left[\frac{G_1}{G_2(1 - G_1 G_2)} \right]^{1/4}, \\ \omega_{01} &= \left(\frac{\lambda_0 b}{\pi} \right)^{1/2} \left[\frac{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)^{1/2}}{G_1 + a^2 G_2 - 2a G_1 G_2} \right]^{1/2}, \\ \omega_{02} &= \left(\frac{\lambda_0 b}{\pi} \right)^{1/2} \left[\frac{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)^{1/2}}{G_2 + d^2 G_1 - 2d G_1 G_2} \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (4)$$

若腔内热透镜焦距 f 已知,可以根据其它条件,如根据腔的结构要求给定 d_1, d_2 ,由(2)和(3)式来确定 R_1, R_2 ;也可以给定 R_1, R_2 来确定 d_1 和 d_2 。从

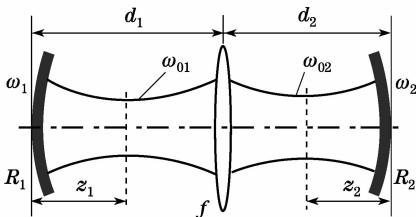


图 1 包含热透镜效应的谐振腔结构

Fig. 1 Resonator cavity structure contains thermal-lens effect

而保证谐振腔的稳定条件,并确定光斑尺寸参量 $\omega_1, \omega_2, \omega_{01}, \omega_{02}$ 。

2.2 模式法波前重构

H-S 波前传感器基本原理是利用一个微透镜阵列将被测孔径分为许多子孔径,用成像器件测出微透镜阵列焦平面上的畸变波前所成像斑质心坐标与参考波前质心坐标之差,然后进行波前重构求出全孔径波前的相位分布,在许多领域得到广泛应用^[8-10]。常用的波前重构方法是 Zernike 模式法和区域法,模式法由 R. Cubalchini 提出,即入射光束波前畸变 $\varphi(x, y)$ 用模式函数系列 $Z_k(x, y)$ 展开^[11,12]

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k Z_k(x, y), \quad (5)$$

式中 k 为模式数; a_k 为待定的各模式系数。其实质是建立起模式函数系列 $Z_k(x, y)$ 与波前传感器测量的波前相位斜率间的关系,以求解各个模式系数 a_k ,从而得到完整的波前展开式。波前传感器测量的第 j 个子孔径内的入射光束波前相位平均斜率 G_{jx} 和 G_{jy} 为

$$\begin{aligned} G_{jx} &= \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \right]_j dx dy = \\ &= \sum_{k=1}^l \left(\frac{a_k}{s_j} \right) \iint_{s_j} \left[\frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} \right]_j dx dy = \\ &= \sum_{k=1}^l a_k Z_{jkx}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} G_{jy} &= \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right]_j dx dy = \\ &= \sum_{k=1}^l \left(\frac{a_k}{s_j} \right) \iint_{s_j} \left[\frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} \right]_j dx dy = \\ &= \sum_{k=1}^l a_k Z_{jky}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 s_j 表示第 j 个子孔径的面积。并且有

$$\begin{aligned} Z_{jkx} &= \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[\frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} \right]_j dx dy \\ Z_{jky} &= \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[\frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} \right]_j dx dy, \end{aligned} \quad (8)$$

设波前传感器共有 M 个子孔径,取模式函数序列 $z_k(x, y)$ 的前 l 项进行波前重构,并表示成矩阵形式则有

$$\mathbf{G} = \mathbf{Z}\mathbf{A}, \quad (9)$$

式中 \mathbf{G} 为波前相位斜率向量,包括波前传感器测量的入射光束波前相位在所有子孔径内 x 和 y 方向

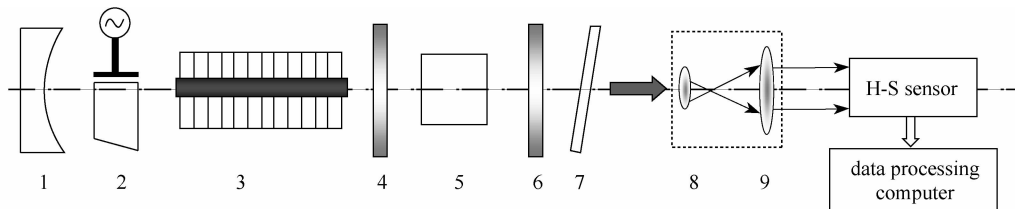
的平均斜率, \mathbf{Z} 为波前重构矩阵, \mathbf{A} 为待定的模式函数系数向量。利用波前传感器测量得到波前相位斜率向量 \mathbf{G} 后, 利用奇异值分解法求出波前重构矩阵 \mathbf{Z} 的广义逆 \mathbf{Z}^+ , 可得到模式函数系数向量 \mathbf{A} 在最小二乘意义下的最小范数解

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}^+ \mathbf{G}, \quad (10)$$

将(10)式计算得到的模式函数系数向量 \mathbf{A} 代入(5)式, 即可得到完整的波前相位展开式。模式法波前重构算法的关键是模式函数系列及模式数的选取。

3 实验装置

图 2 所示为激光二极管(LD)抽运声光调 Q 激光器输出光束特性测试光路。激光器系统主要由全



1: HR concave mirror; 2: acousto-optic Q-switch; 3: LD pumped Nd:YAG module; 4: harmonic mirror; 5: KTP crystal; 6: output mirror; 7: optical filter; 8, 9: laser beam expander

图 2 LD 抽运声光调 Q 激光器输出光束特性测试光路

Fig. 2 Experimental setup of testing the beam properties for the LD pumped acousto-optic Q-switched laser

4 结果分析与讨论

设模拟参数为 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, $d_1 = 250 \text{ mm}$, $d_2 = 250 \text{ mm}$, $R_1 = 3.0 \text{ m}$, $R_2 = \infty$ 。根据(3)式, 可以求得 f 的最小值为 125 mm , 其变化范围为 $125 \text{ mm} \sim \infty$ 。即只要 f 不小于此最小值, 总能满足稳定输出条件, 根据 2.1 节分析可求出 f 在此范围内的光斑尺寸的变化范围或稳定输出的情况。从图 3 知在平凹稳定腔情形下, ω_1 、 ω_2 、 ω_{01} 、 ω_{02} 都随 f 的增加而增大, 并且曲线斜率的变化是逐渐减小的。一旦热透镜的最短焦距确定, 则在系统结构设计通过选择恰当的谐振腔结构参量, 就能保证在热透镜效应的动态范围内仍能保持腔的稳定性。

在测量激光束输出波前像差前, 首先用激光器系统中的调腔光(He-Ne 光)在静态条件下对 H-S 传感器进行了标定, 因此文中探测到的实际波前像差为相对于 He-Ne 标定波前而言。CCD 探测到的扩束后激光为 16×16 光斑点阵, 采用圆域 Zernike 模式法进行波前重构, 重构时去除了 x 和 y 方向倾斜。图 4(a) 给出了波前相位分布的 100 帧平均值, 采样时间为 4 s。激光器工作参数为: LD 抽运阵列模组工作电流

反凹面镜、声光 Q 开关、激光二极管抽运模组、KTP 谐波转换晶体及输出镜构成。抽运模组由 5 个 LD 阵列构成, 在输入电流为 60 A , 最大抽运功率约 125 W 。其中平面镜 4 上镀增透膜与高反膜, 即对 1064 nm 波长透射率为 93% , 对 532 nm 反射率为 95% 。采用滤波器 7 消除输出光束中未倍频红外基波。其中 8、9 构成望远镜扩束系统, 将输出光扩束为直径约 10 mm 。对输出光束进行衰减, 并对点阵图像亮度和对比度值作适当设定, 使采集到的光斑既不能饱和, 也不能太暗, 则在进行波前重构时能有效减小误差。H-S 传感器子孔径阵列数为 32×32 , 探测的光斑点阵采用 2.2 节方法对点阵图像进行波前相位重构。

为 37 A , 激光器输出功率约 13.5 W , Q 开关重复频率 5.9 kHz , 倍频绿光为准连续输出。图 4 中 x , y 坐标单位为像素, 波前像差单位为波长(光程差 ΔL), $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。即在给定实验条件下峰谷值 (ΔL_{PV}) 为 2.569λ , 均方根 (ΔL_{RMS}) 为 0.443λ 。若去除波前像差中的 $Z_3 \sim Z_5$ (离焦、 $0^\circ/90^\circ$ 方向像散和 $45^\circ/135^\circ$ 方向像散), 则波前像差则减小至 PV 值为 1.066λ , RMS 值为 0.168λ 。

图 5 结果表明输出光束中的包含一些主要像差, 如离焦 Z_3 系数为 0.464 , 低阶像散 Z_4 和 Z_5 系数分别为 -0.053 和 -0.183 , 球差 Z_{10} 系数为 0.059 , 高阶 Zernike 系数 Z_{13} 为 -0.101 。主要波前相位畸变集中在前 12 阶, 其中离焦、像散等是降低光束质量的主要像差。由于晶体热透镜效应带来等效谐振腔结构改变, 还包括半导体抽运组件产生的热效应和光学频率转换中非线性晶体热效应等, 导致输出光束中离焦和球差的产生。图 6 给出了离焦像差 Zernike 系数随采样时间的变化, 经计算在 40 s 内的平均离焦系数为 0.464λ 。

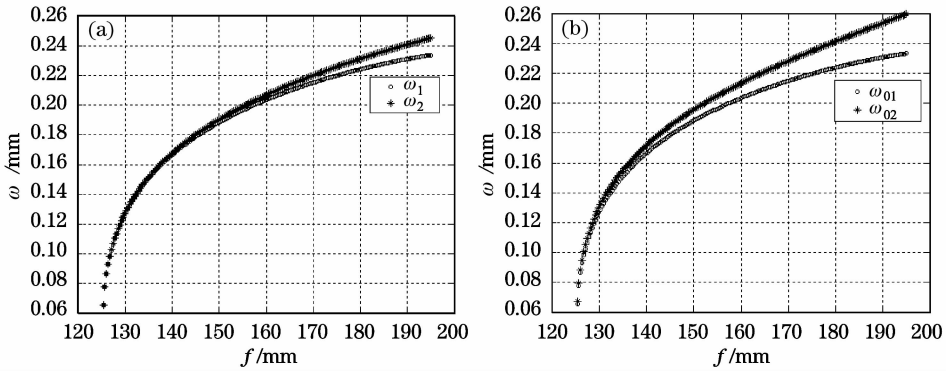


图3 平凹稳定腔情形下热透镜焦距与光斑尺寸的关系

Fig. 3 Beam spot size in the plano-concave stable resonator as a function of the focal length of thermal lens

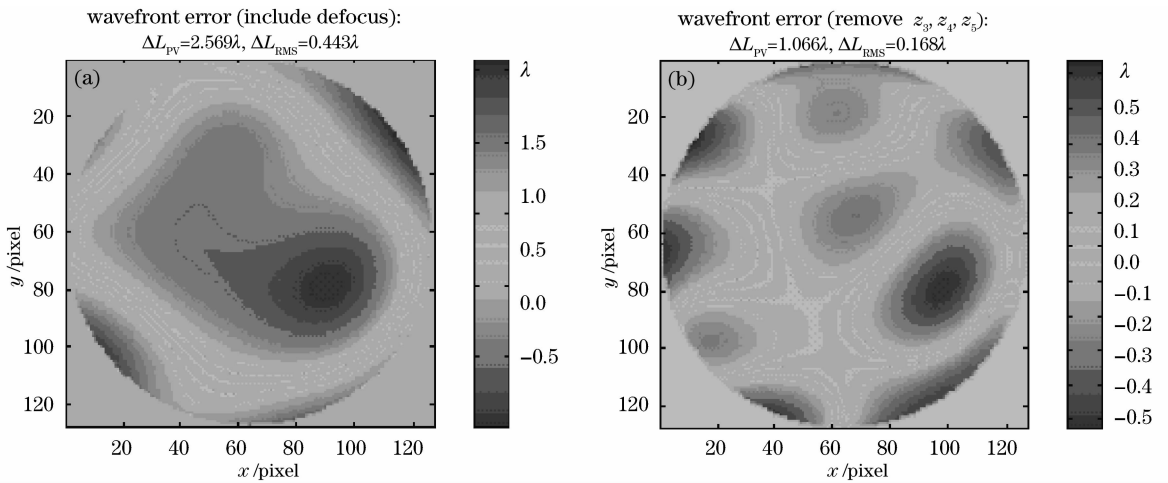


图4 LD侧面抽运全固态激光器输出畸变波前相位分布。(a) 100帧波前相位平均值；(b) 重构时去除 $Z_3 \sim Z_5$ 系数

Fig. 4 Wavefront distribution of the output mode for the LD side-pumped Nd:YAG laser. (a) mean value for 100 frames; (b) remove $Z_3 \sim Z_5$ aberration

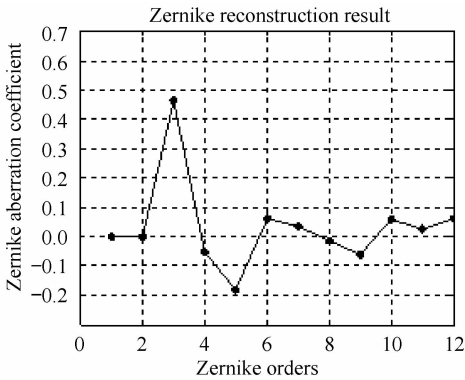


图5 前12阶 Zernike 系数(100帧采样平均值)

Fig. 5 First 12 order Zernike aberration coefficients (the mean value for 100 frames)

图7是由实验数据进一步计算得到的环围能量曲线和点扩散函数分布。图7(a)中曲线1表示无畸变光束对应的环围能量曲线,曲线2则对应实际测量波前(为100帧测试结果平均值)。横轴代表衍

射极限倍数,纵轴为归一化环围能量数值,由曲线即可知在不同环围能量值时对应的光束质量。波前像差 PV 和 RMS 值随时间的动态变化曲线如图8所示,其中采样时间为 40 s。表1给出了前10阶 Zernike 像差系数定义及测得量值。

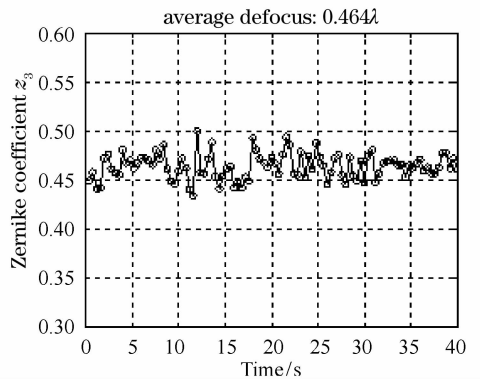


图6 离焦 Zernike 像差系数 z_3 随时间的变化

Fig. 6 Defocus Zernike coefficient z_3 versus sampling time

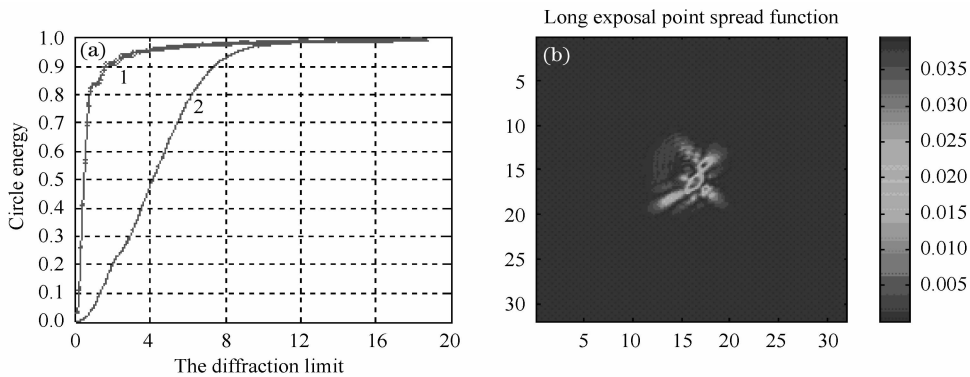


图 7 输出光束波前的环围能量曲线(a)和点扩散函数(b)分布(100 帧平均值)

Fig. 7 Distribution of circle energy (a) and long exposure point spread function (b)

表 1 前 10 阶 Zernike 像差定义及实验测试结果

Table 1 Definition of the front 10 order Zernike aberration and experimental test results

Order	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}
Aberration	X tilt	Y tilt	defocus	0/90° astigmatism	45/135° astigmatism	X coma	Y coma	high order astigmatism	high order astigmatism	spherical aberration
Zernike coefficient	-2.372	-0.433	0.464	-0.053	-0.183	0.062	0.035	-0.014	-0.063	0.059

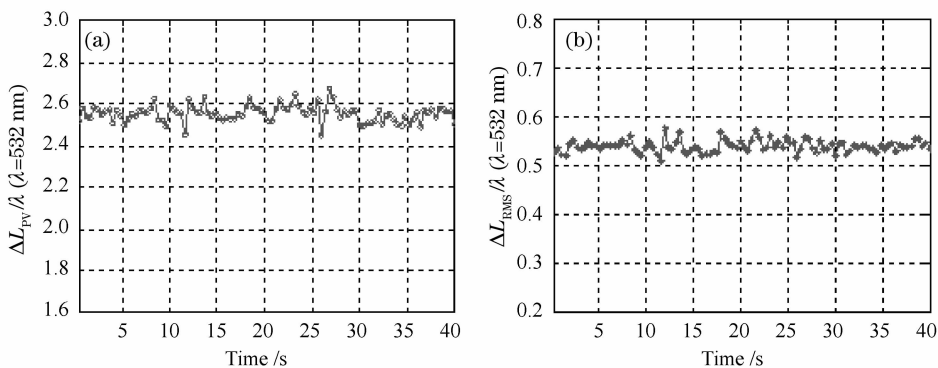


图 8 输出光束波前的 $\Delta L_{PV}/\lambda$ (a) 和 ΔL_{RMS} (b) 像差随时间的变化

Fig. 8 PV (a) and RMS values (b) of the output aberrated wavefront versus the sampling time

5 结 论

简要分析了热透镜效应对稳定腔内光斑尺寸的影响,进一步采用 H-S 波前传感器对采用稳定腔结构的二极管抽运全固态声光调 Q 激光器输出倍频光束模式特性进行了实验分析。在腔外用 H-S 波前传感器进行光斑点阵探测,并采用 Zernike 模式法进行波前重构,可以较好地反映输出光束波前像差。实验得到了各阶 Zernike 像差系数、波前峰谷值和均方根值等畸变参量,进一步计算还可得到环围能量曲线分布等,从而全面了解输出光束质量。研究表明输出倍频光的波前 Zernike 像差主要集中在前 15 阶,由于各种热效应包括抽运组件、增益介质和频率转换晶体热效应的影响,其中比较显著的

像差有离焦 Z_3 、低阶像散 Z_4 和 Z_5 、以及球差 Z_{10} 等。该分析测试方法可为进一步研究全固态激光器热效应补偿和输出光束像差校正问题提供一定参考。

参 考 文 献

- Lü Baida. Solid State Laser[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002: 203~212
吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002: 203~212
- Jiang Jianping. Semiconductor Laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 352~358
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 352~358
- M. Tsunekane, N. Taguchi, H. Inaba. Improvement of thermal effects in a diode-end-pumped, composite Tm:YAG rod with undoped ends[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(9): 1788~1791
- Y. F. Chen, G. M. Huan, C. F. Kao *et al.*. Optimization in

- scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~1429
- 5 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO₄ slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
- 邵 杰, 李小莉, 冯宇彤 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501
- 6 Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen *et al.*. Thermal-induced birefringence-compensated laser system with two Nd:YAG rods[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1483~1487
- 刘 崇, 葛剑虹, 项 震 等. 双棒串接补偿热致双折射效应激光谐振腔[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1483~1487
- 7 Zilun Chen, Jing Hou, Zongfu Jiang. Theoretical analysis of thermal effects in fiber laser from the moment when pump is turned on to steady-state[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 178~180
- 8 M. C. Roggemann, A. C. Koivunen. Wave-front sensing and deformable-mirror control in strong scintillation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(5): 911~919
- 9 P. M. Prieto, F. V. Martín, S Goelz *et al.*. Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(8): 1388~1398
- 10 D. Dayton, B. Pierson, B. Spielbusch *et al.*. Atmospheric structure function measurements with a Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(24): 1737~1739
- 11 R. Cubalchini. Modal wave-front estimation from phase derivative measurements[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(7): 972~977
- 12 G. Lane, M. Tallon. Wave-front reconstruction using a Shack-hartmann sensor[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(32): 6902~6908