

文章编号: 0253-2239(2010)s100505

# 被动调 Q 脉冲 YAG 板条激光器输出 光束波前像差分析

张 翔 蔡 青 苏礼坤

(成都信息工程学院光电技术系, 四川 成都 610225)

**摘要** 高功率被动调 Q 脉冲 YAG 板条激光器出光过程中的诸多腔内相位扰动因素, 均会直接影响到激光输出功率和光束质量。采用哈特曼-夏克(H-S)波前传感原理和模式法波前重构对侧面抽运脉冲板条激光器输出倍频光束特性进行实验测试与分析, 得到了波前像差分布及对应的峰谷值(PV)和均方根值(RMS)、波前畸变包含的各阶泽尼克像差系数。进一步计算得到了环围能量曲线和点扩散函数分布等。从而可全面了解输出光束质量和动态波前像差特性。分析表明输出倍频光的波前泽尼克像差主要集中在前 10 阶, 由于晶体热效应及腔内相位扰动因素影响, 光束中较显著的波前像差系数有离焦  $A_3$ 、低阶像散  $A_5$ 、慧差  $A_6$  和球差  $A_{10}$  等。

**关键词** 激光光学; 脉冲板条激光器; 哈特曼-夏克传感器; 波前重构; 模式畸变特性; 泽尼克像差

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100505

## Analysis of Output Mode Properties for a Passively Q-switching Slab YAG Laser

Zhang Xiang Cai Qing Su Likun

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

**Abstract** Many factors of intracavity perturbation can degrade output power and beam quality in high power passive Q-switching slab lasers. The experiment test on output beam quality of a passive Q-switching zig-zag slab laser has been performed by adopting Hartmann-Shack (H-S) wavefront sensor and Zernike modal reconstruction theory. In this way, peak value (PV) and root mean square (RMS) values of the wavefront aberration, and Zernike aberration of each order can be acquired accurately. Moreover, distribution of circle energy in far-field, point spread function (PSF) and other beam evaluation factors can also be obtained by further calculation, so the beam quality can be illuminated comprehensively. Results analysis show that the wavefront aberration of beam mainly concentrates in the frontal 10 ranks of Zernike aberration, mainly including the defocus  $A_3$ , the low-order astigmatism  $A_5$ , the coma aberration  $A_6$  and the spherical aberration  $A_{10}$  because of the crystal thermal effect and intracavity aberrated perturbation.

**Key words** laser optics; pulsed slab laser; H-S wavefront sensor; phase reconstruction; aberrated mode properties; Zernike aberration

**OCIS codes** 140.3540; 140.3538

## 1 引 言

板条激光器由于具有输出能量高和光束质量好等特点, 在激光技术中获得广泛应用<sup>[1]</sup>。但随着激光器输出功率或能量的提高, 出光过程中的各类腔内扰动因素如腔镜几何失调、抽运组件产生的热效

应、晶体热效应以及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<sup>[2~4]</sup>。在输出功率或能量较高时, 通过对系统结构改进设计或对主要像差进行控制从而保证良好光束质量是激光技术研究热点问题<sup>[5,6]</sup>, 而其中采用

收稿日期: 2010-05-30; 收到修改稿日期: 2010-07-06

基金项目: 张 翔(1976—), 男, 博士, 主要从事激光技术和光电探测方面的研究。E-mail: zhanghk23@yahoo.com.cn

自适应光学技术进行像差补偿是改善高功率激光器光束质量的重要手段之一<sup>[7]</sup>。因此对激光器输出波前像差特性进行分析,从理论和实验两方面细致研究腔内相位扰动因素与激光器模式特性如输出光强和相位分布的对应关系,对于进一步研究腔内波前相位校正具有重要意义。

本文采用哈特曼-夏克(H-S)波前传感方法和模式法波前重构原理对侧面抽运脉冲板条激光器输出倍频光光束特性进行了实验测试分析,得到了波前相位分布、泽尼克像差系数和环围能量分布等评定指标,从而可以全面了解脉冲板条激光器输出光束模式像差特性。

## 2 基本理论

### 2.1 泽尼克模式法波前重构原理

H-S波前传感器基本原理在于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畸变波前所成像斑质心坐标与参考波前质心坐标之差,再进行波前重构求出全孔径波前相位分布。这一技术已在许多领域得到广泛应用<sup>[8~11]</sup>。常用的波前重构方法是泽尼克(Zernike)模式法和区域法。模式法由 R. Cubalchini 提出<sup>[12]</sup>,即入射光束波前相位畸变  $\varphi(x, y)$  可用模式函数系列  $Z_k(x, y)$  展开

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

其中  $a_k$  为待定的各模式系数。重构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。波前传感器测量到的第  $j$  个子孔径内的入射光束波前相位平均斜率  $G_{jx}$  和  $G_{jy}$  分别为

$$\begin{aligned} G_{jx} &= \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[ \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x} \right]_j dx dy \\ &= \sum_{k=1}^l \left( \frac{a_k}{s_j} \right) \iint_{s_j} \left[ \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} \right]_j dx dy \\ &= \sum_{k=1}^l a_k Z_{jkx}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} G_{jy} &= \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[ \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y} \right]_j dx dy \\ &= \sum_{k=1}^l \left( \frac{a_k}{s_j} \right) \iint_{s_j} \left[ \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} \right]_j dx dy \\ &= \sum_{k=1}^l a_k Z_{jky}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $l$  为模式数;  $s_j$  表示第  $j$  个子孔径的面积。并

且有

$$\begin{aligned} Z_{jkx} &= \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[ \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x} \right]_j dx dy, \\ Z_{jky} &= \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[ \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y} \right]_j dx dy, \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$\mathbf{G} = \mathbf{Z}\mathbf{A}, \quad (5)$$

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,再利用奇异值分解法求出波前重构矩阵  $\mathbf{F}$  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

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}^+ \mathbf{G}. \quad (6)$$

将(6)式计算得到的模式函数系数向量  $\mathbf{A}$  代入(1)式,就可以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波前重构中模式函数系列及模式数的选取。

### 2.2 远场环围能量分析

激光光束波前的复振幅分布  $E_1(x_1, y_1)$  可以表示为

$$E_1(x_1, y_1) = A_1(x_1, y_1) \exp[j\varphi(x_1, y_1)], \quad (7)$$

式中  $A_1(x_1, y_1)$  和  $\varphi(x_1, y_1)$  分别表示光束波前振幅和相位随空间坐标  $(x_1, y_1)$  的变化。光束波前  $E_1(x_1, y_1)$  通过理想成像透镜形成的远场分布为

$$E_2(x_2, y_2) = \text{FFT}\{E_1(x_1, y_1)\}, \quad (8)$$

$E_2$  为激光束波前经过理想成像透镜后形成的远场光斑,其强度分布为

$$I_2(x, y) = |E_2(x_2, y_2)|^2. \quad (9)$$

远场光斑能量集中度是表示光束质量的重要指标之一,可用归一化环围能量表示为

$$E_r = \frac{1}{E} \sum_{r < r} I_2(x_2, y_2), \quad (10)$$

式中  $E_r$  表示远场光斑在环围窗口内的归一化能量,其值越大,表明远场光斑能量集中度越高;  $r$  表示环围窗口尺寸;  $E$  为远场光斑总能量; 且有

$$t = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2}, \quad (11)$$

式中  $(x_0, y_0)$  代表远场光斑峰值光强处的坐标。设数值计算出的点扩散函数为  $N \times N$  点阵,则  $r$  的最大取值范围  $r_{\max}$  为正方形对角线宽度。(10)式中  $E$  为  $N \times N$  个像素点之对应值的总和。  $t = r_1, r_2, \dots,$

$r_n, \dots, r_{\max}, r_{n+1} = r_n + \Delta r, r_1 = 0$ , 步长  $\Delta r$  为 1 个像素。

### 3 实验装置

图 1 所示为搭建的侧面抽运脉冲板条激光器输出光束模式特性分析光路。激光器系统主要由全反凹镜、YAG:Cr<sup>+</sup> 被动调 Q 晶体、板条晶体、KTP 谐波转换晶体及输出镜构成。采用平凹型稳定腔，凹镜曲率半径为 2.0 m, 腔长约 520 mm; 板条晶体采用脉冲放电灯抽运。系统可以手动单脉冲工作, 也

可以重复频率脉冲输出, 最大重复频率为 5 Hz。其中平面镜 6 镀增透膜与高反膜, 即对 1064 nm 波长透射率为 94%, 对 532 nm 反射率为 96%。输出镜 8 上镀多层介质膜对 532 nm 高透, 而对 1064 nm 高反。其中 2 为望远镜扩束系统, 将定标 He-Ne 激光扩束为直径约 6 mm 参考平面波前。H-S 传感器有效子孔径阵列为 62×49, 标定中心波长为 633 nm。探测到的为圆形光斑点阵, 采用 2.1 节所述圆域正交 Zernike 多项式进行波前相位重构。

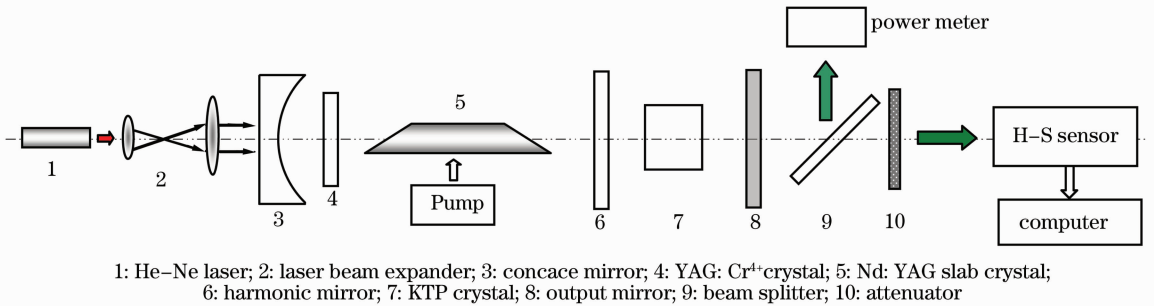


图 1 被动调 Q 脉冲 YAG 板条激光器输出模式特性测试光路

Fig. 1 Experimental setup of testing beam properties for the passive Q-switching pulsed slab laser

### 4 结果分析与讨论

在测量激光束输出波前像差前, 首先采用 He-Ne 激光器在静态条件下对 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 激光标定波前而言。由于低阶倾斜像差对光束质量无影响, 只是带来远场光斑质心的偏移, 因此在波前重构时去除了  $x$  和  $y$  方向倾斜。图 2 为由

H-S 探测到光斑点阵后, 采用圆域 Zernike 模式法进行波前重构得到的相位二维和三维分布, 即采集了 50 frame 图像, 经波前重构后求取的平均值。此时激光器工作状态为: 抽运电压为 1100 V, 输出倍频后的 532 nm 绿光单脉冲能量约 127.6 mJ, 由于出光过程中的动态扰动因素, 经测量计算, 输出单脉冲能量波动约 3.9%。

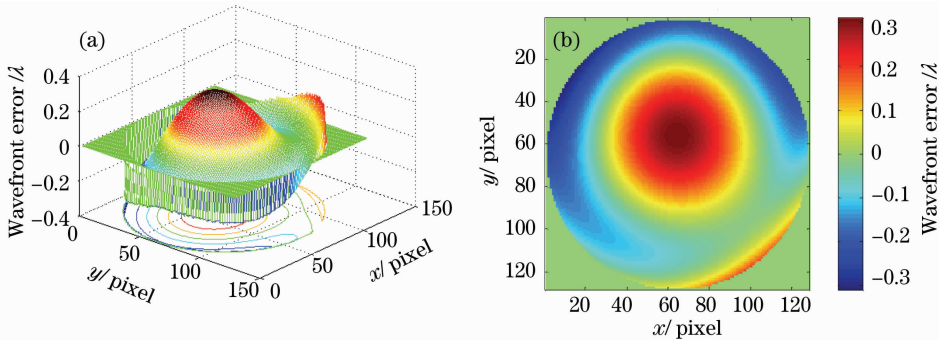


图 2 侧面抽运脉冲板条激光器输出畸变波前相位分布。(a) 三维波前相差图; (b) 二维波前相差图, 50 frame 平均值

Fig. 2 Wavefront distribution of the output beam mode for the side-pumped Nd:YAG slab pulsed laser.

(a) 3-D wavefront error; (b) 2-D wavefront error; Mean value for 50 frame

图 2(a) 中  $x, y$  坐标单位为像素, 波前像差单位为波长 (光程差,  $\lambda$  为 532 nm)。由图知在给定实验条件下峰谷值 (PV) 为 0.623  $\lambda$ , 均方根值 (RMS) 为 0.125  $\lambda$ 。

图 3 给出了输出波前像差 PV 值随采样时间的变化, 由于出光过程中腔内动态相位扰动因素影响, 波前像差 PV 值约有 6.8% 的波动, PV 平均值为 0.62  $\lambda$ 。实验也测试了抽运电压与输出能量之间的

关系如图 4, 总体而言, 由于板条晶体热效应及增益饱和效应较小, 拟合曲线呈现较好线性函数关系。

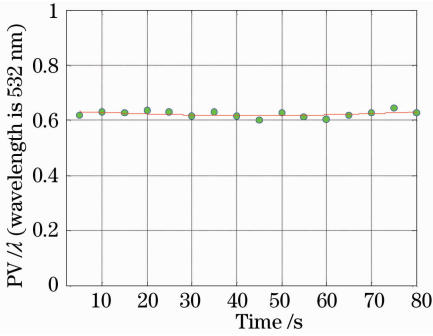


图 3 输出光束波前的 PV 像差随时间的变化。  
Fig. 3 PV error values of the output aberrated wavefront versus sampling time.

图 5 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 5(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 50 frame 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。可知当  $E=0.84$  环围处, 光束质量为 1.97 倍衍射极限。

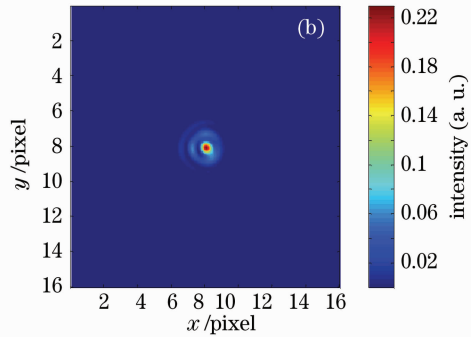
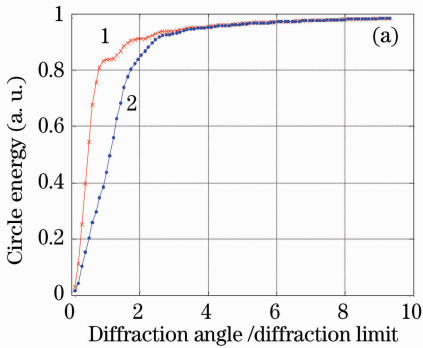


图 5 (a) 输出光束波前的环围能量曲线分布(50 frame 平均值); (b) 点扩散函数

Fig. 5 (a) Distribution of circle energy for the average value of 50 frame wavefront; (b) long exposal (PSF)

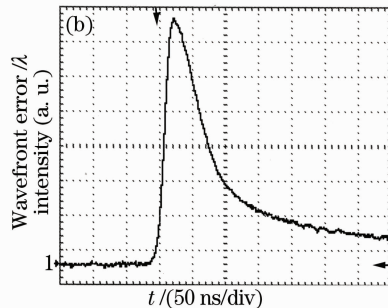
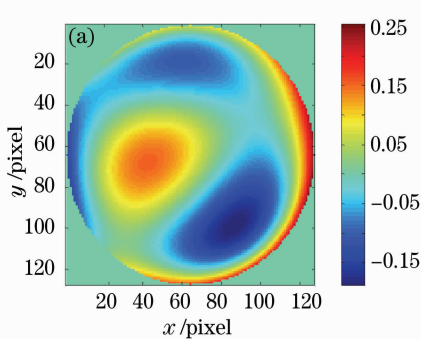


图 6 (a) 重构时去除 Zernike 系数  $A_3$  时的波前分布 (b) 输出脉冲波形

Fig. 6 (a) Wavefront error when defocus aberration is removed; (b) distribution of output pulse shape

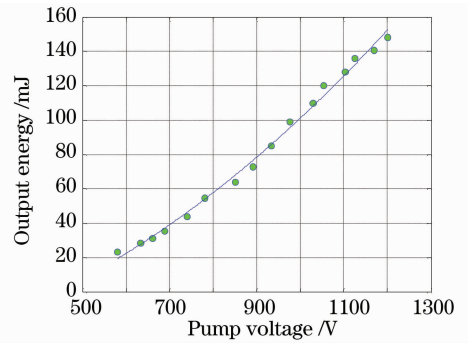


图 4 抽运电压与输出单脉冲能量的关系。

Fig. 4 Laser pump voltage versus output pulse energy.

调 Q 后, 可能是因为晶体非线性漂白效应所致, 故输出光束质量较好, 建议可进一步在腔内插入小孔光阑选模来进一步提高光束质量。由图 2(a) 和图 6(a) 对比可知由于增益晶体热效应的影响, 离焦像差是主要波前畸变因素之一; 为改善光束质量, 实际应用中应采用优化或补偿结构设计予以减小。图 6(b) 为  $\text{Cr}^{4+}$  被动 Q 调制晶片工作时输出的脉冲波形, 脉宽在半峰全宽 (FWHM) 处约 70 ns。图 6 中 PV 为  $0.442 \lambda$ , RMS 为  $0.059 \lambda$ 。

表1 前10阶Zernike像差定义及实验分析结果

Table1 Meaning of the first 10 order Zernike aberration and experimental test results

| Order                  | $A_1$  | $A_2$  | $A_3$   | $A_4$                 | $A_5$                   | $A_6$  | $A_7$  | $A_8$                     | $A_9$                     | $A_{10}$                |
|------------------------|--------|--------|---------|-----------------------|-------------------------|--------|--------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Aberration             | X tilt | Y tilt | Defocus | 0 /90°<br>astigmatism | 45 /135°<br>astigmatism | X coma | Y coma | High order<br>astigmatism | High order<br>astigmatism | Spherical<br>aberration |
| Zernike<br>coefficient | 0.028  | 0.021  | -0.115  | 0.017                 | -0.020                  | 0.056  | 0.011  | 0.014                     | -0.006                    | 0.042                   |

表1给出了前10阶Zernike像差系数的定义及测得的具体量值。结果说明输出光束中包含一些主要像差,如离焦 $A_3$ 系数为-0.015,低阶像散 $A_4$ 和 $A_5$ 系数分别为0.017和-0.020, $x$ 方向低阶慧差 $A_6$ 系数为0.056,球差 $A_{10}$ 系数为0.042。表明主要波前相位畸变集中于前10阶。由于抽运组件和板条晶体热效应带来的等效谐振腔结构改变,以及腔内谐波转换晶体的热效应等因素,导致输出光束中有一定离焦和球差。

## 5 结 论

激光器出光过程中的各种腔内相位扰动因素会直接影响输出光束模式特性。对采用稳定腔结构的侧面抽运脉冲YAG板条激光器输出倍频光束质量特性进行了实验分析。在腔外采用H-S波前传感器对激光束进行光斑点阵探测,并用圆域Zernike模式法进行波前重构,可以较全面了解输出光束各阶畸变成分及动态波前像差特性。实验得到了各阶Zernike像差系数、波前PV和RMS等畸变参量,进一步计算还得到了环围能量曲线、点扩展函数等光束质量评定参数,分析表明输出倍频光波前Zernike像差主要集中在前10阶,由于出光过程中的热效应和腔内其它扰动因素影响,波前分布中较明显的像差主要有离焦 $A_3$ 、低阶像散 $A_4$ 或 $A_5$ 、低阶慧差 $A_6$ 以及球差 $A_{10}$ 等。本文分析方法可为进一步研究高功率固体激光器输出光束波前畸变补偿相关问题提供参考。

## 参 考 文 献

- 1 Keming Du, Hengli Zhang, Daijun Li *et al.*. Electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with a high repetition rate and a short pulse width[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(2): 87~89
- 2 Jie Yuan, Xingwu Long, Bin Zhang *et al.*. Optical axis perturbation in folded planar ring resonators[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(25): 6314~6322
- 3 Fan Ting, Gao Feng, Shi Peng *et al.*. Thermal effect in Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal slab by laser diode double-side pumped[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 339~344  
范婷,高峰,史彭等.激光二极管双侧面抽运平板Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体热效应[J].中国激光,2010,**37**(2):339~344
- 4 Lin Lin, Guo Zhen, Wang Shiyu *et al.*. Nonuniformity of thermal effect in a ld side-pumped laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1766~1771  
林林,过振,王石语等.激光二极管侧面抽运激光器热效应的不均匀性[J].中国激光,2009,**36**(7):1766~1771
- 5 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
- 6 Y. Ojima, K. Nawata, T. Omatsu. Over 10-watt pico-second diffraction-limited output from a Nd:YVO<sub>4</sub> slab amplifier with a phase conjugate mirror[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 8993~8998
- 7 W. Lubeigt, G. Valentine, D. Burns. Enhancement of laser performance using an intracavity deformable membrane mirror [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 10943~10955
- 8 J. Liang, B. Grimm, S. Goelz *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with use of Hartmann-Shack sensors[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(7): 1949~1957
- 9 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
- 10 E. Ribak, S. Ebstein. A fast modal wave-front sensor[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(3): 152~157
- 11 A. F. Brooks, T. L. Kelly, P. J. Veitch *et al.*. Ultra-sensitive wavefront measurement using a Hartmann sensor [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(16): 10370~10375
- 12 R. Cubalchini. Modal wave-front estimation from phase derivative measurements[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(7): 972~977