

腔内像差扰动对正支共焦腔模式的影响及 腔内像差校正

张 翔 朱兴华 向安平

(成都信息工程学院光电技术系, 四川 成都 610225)

摘要 腔内像差扰动对激光器输出模式有显著的影响,直接带来输出光束质量和能量的下降。采用数值迭代法分析了正支共焦腔内倾斜扰动对耦合输出相位模式的影响,并采用泽尼克像差对波前相位进行了拟合,得到前 35 阶泽尼克系数、点扩展函数(PSF)和环围能量曲线,从而全面反映光束质量。并采用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack, H-S)波前传感器进行了实验定量测定,用模式法进行了波前复原计算。针对腔内低阶像差校正问题进行了原理性实验研究,建立了控制腔内凸镜的像差校正系统。结果表明,控制系统对腔内准静态像差扰动闭环效果较好,输出光束前 10 阶泽尼克像差、波前畸变的峰值(PV)和均方根(RMS)值得到明显减小。

关键词 激光技术; 非稳腔; 腔内扰动; 哈特曼-夏克波前传感器; 泽尼克像差; 腔内像差控制

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Effect of Intracavity Perturbation on Mode Properties and Tilt-Aberrated Correction for Confocal Unstable Resonators

Zhang Xiang Zhu Xinghua Xiang Anping

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

Abstract The influence on outcoupled phase mode by introducing intracavity tilt-perturbation in confocal unstable resonators is researched by adopting Fox-Li prony method. The distribution of wavefront has been analyzed by using Zernike aberration and mode reconstruction theory. The front 35-order Zernike aberration coefficient, point spread function (PSF) and the integrated relative far-field intensity are obtained, so the beam quality can be known fully. The properties of mode distortion are also studied experimentally by adopting Hartmann-Shack (H-S) wavefront sensor. Finally, a set of control system for intracavity perturbation is constructed and the correction for intracavity low-order aberration is performed experimentally. The result of intracavity correction shows that the system can achieve good correction for static intracavity perturbation when the control loop is closed after tilt is introduced. The front 10-order Zernike aberration, the peak value (PV) and root-mean-square (RMS) error of the wavefront have been reduced remarkably.

Key words laser technique; unstable resonators; tilt perturbation; Hartmann-Shack wavefront sensor; Zernike aberration; intracavity tilt correction

1 引 言

激光器出光时腔内的各种扰动,会直接影响激光器输出能量分布并导致光束质量下降。对于采用正支共焦非稳腔结构的激光器系统,目前实验研究发现腔内各种像差扰动如增益密度不均匀^[1]、腔镜变形^[2]及其几何结构失调^[3]、工作物质热效应^[4]等都会影响腔模分布,从而直接带来输出光束质量的下降。以腔内倾斜像差为例,当腔内存在较大倾斜

扰动时,不仅直接导致输出光束能量密度分布不均,且伴随许多高阶像差的增大,从而严重影响光束质量。因此在激光器输出光束能量一定的前提下,尽可能提高光束质量是一个提高激光器效率的热点课题。为此应当研究腔镜的失调对输出光束质量的影响,并找出对光束质量影响最大的因素,这对于腔内像差校正或建立腔内控制系统具有重要意义。文献^[5]在腔内采用变形镜和爬山法对校正腔内不同

基金项目: 国家 863 高技术(2004AA822100)资助课题。

作者简介: 张 翔(1976—),男,四川人,博士,副教授,主要从事激光技术和器件等方面的研究。

E-mail: zhanghk23@yahoo.com.cn

量值的静态、动态倾斜效果做了比较；文献[6]对引入腔内像差扰动的非稳腔做了数值计算。在此基础上，本文针对无源正支共焦腔的情形，分析了光腔在失调后对耦合输出调腔光的影响，采用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack, H-S)传感器在腔外对光束质量进行测量，并采用模式法进行波前复原，完成了腔内倾斜像差校正的原理性实验。

2 基本理论

2.1 模式求解原理

研究非稳腔模式特性，可以求解非稳腔在理想及腔内像差扰动状态下的本征模分布。求解谐振腔振荡模式的方法较多，通常采用迭代法求解积分方程

$$\varphi(x, y) = \gamma \frac{i}{\lambda L} \iint_{S_1} u_q(x, y, x', y') \varphi(x', y') dS', \quad (1)$$

式中 φ 为本征函数， L 为谐振腔长度， γ 为本征值， λ 为波长， u_q 为积分方程的核，

$$u_q(x, y, x', y') = \frac{ik}{4\pi} \frac{\exp[-ik\rho(x, y, x', y')]}{\rho^{(x, y, x', y')}} \times (1 + \cos \theta), \quad (2)$$

式中 ρ 为源点 (x', y') 与观察点 (x, y) 之间连线的长度， θ 为源点 (x', y') 处的法线与 ρ 连线的夹角， $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢的模。对腔内无扰动情况，(2)式可以进一步分离变量进行求解。对大菲涅耳数非稳腔，还可采用快速傅里叶变换(FFT)方法和等效透镜波导法进行处理。

对于谐振腔镜大小及曲率半径不同的非稳腔，A. E. Siegman 等^[7]将光线在无扰动光腔中的传输过程等效为两个衍射积分方程

$$\begin{cases} \gamma_1 \varphi_1(x) = j^{l+1} (k/L_1) \int_0^{a_2} y J_1(kxy/L_1) \exp[-j(k/2L)(g_1 x^2 + g_2 y^2)] \varphi_2(y) dy, \\ \gamma_2 \varphi_2(y) = j^{l+1} (k/L_1) \int_0^{a_1} z J_1(kyz/L_1) \exp[-j(k/2L)(g_2 y^2 + g_1 z^2)] \varphi_1(z) dz, \\ g = 1 \pm L/R, \end{cases} \quad (3)$$

式中 R 为反射镜的曲率半径， g_1, g_2 为谐振腔的几何参量， J_1 为 1 阶贝塞尔函数。当反射镜凹面向腔内时，(3)式中取“-”号；当凸面向腔内时，(3)式中取“+”号。

对于图 1 所示的折叠腔，当腔内存在相位倾斜扰动时，相当于在无扰动积分方程中附加了一个相位扰动因子^[8]，即

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} u(x_2, y_2) = & -\frac{i}{2\lambda L} \exp(i2kL) \exp\left\{-i \frac{\pi}{\lambda} \frac{2\delta M_x [1 - (L_2 + L_3)/(M_x R_x)]}{M_x + 1} x_2\right\} \times \\ & \iint_S u(x_1, y_1) \exp\left\{-i \frac{\pi}{\lambda} \frac{2\delta M_x [1 - (L_2 + L_3)/(M_x R_x)]}{M_x + 1} x_1\right\} \times \\ & \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda L} \left[\frac{(x_2 - M_x x_1)^2}{M_x + 1} + \frac{(y_2 - M_y y_1)^2}{M_y + 1}\right]\right\} dx_1 dy_1, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $u(x_1, y_1)$ 为凸镜上的光场分布， $u(x_2, y_2)$ 为光场由凸镜传输至凹镜时镜面上的光场分布， S 为凸镜反馈口径面积， δ 为腔内倾斜扰动量， M_x 和 M_y 分别为无扰动光腔在 x 和 y 子午面内的放大倍率， R_x 和 R_y 分别为无扰动时凸镜在 x, y 方向的曲率半径， $L = L_1 + L_2 + L_3$ ， L_1 为凸镜与腔内相位扰动面的距离， L_2 为相位扰动面与腔内折转镜的距离， L_3 为腔内折转镜与凹镜距离。当 $\delta = 0$ 时，(4)式可进一步简化。

2.2 数值模拟结果及分析

由于激光输出模式是一个自再现过程，数值计算

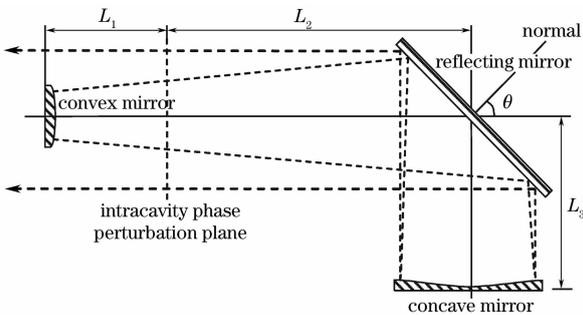


图 1 加入腔内相位扰动面后的正支共焦腔

Fig. 1 Positive-branch confocal unstable resonator by introducing an intracavity phase perturbation plane

时光束应为一个多周期传输过程,直到激光输出波面趋于稳定,这才是实际光束的输出模式。设 φ_n 为第 n 次传输到凸面镜时的光场分布,则应使 φ_{n+1}/φ_n 为复常量因子。数值模拟参量为 $M=2.0, g_1=1.5, g_2=0.75$, 正支共焦腔的等效菲涅耳数 $N_{\text{eq}}=0.31$ 。腔内相位扰动平面距凸面镜为整个腔长的 $1/3$ 。在腔

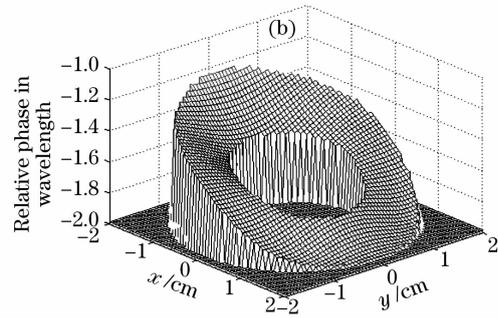
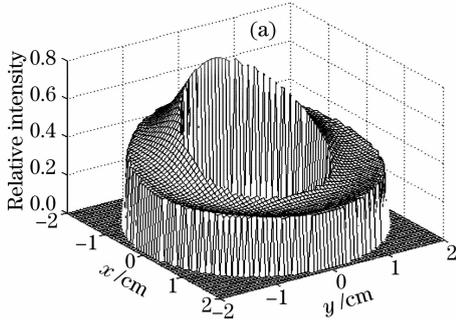


图 2 腔内耦合输出光束相对强度(a)及相位分布(b)

Fig. 2 Relative intensity (a) and relative phase (b) distribution of the coupling output beam

由图 2 可见,输出光束强度呈现一边强,一边弱的情形,而相位分布亦呈现非均匀性,表现为波面峰值(PV)和均方根(RMS)值相对于理想波面均有所增大。

图 3 给出了采用泽尼克像差多项式对图 2(b)波面进行拟合分解的结果,可见其中泽尼克系数 $Z_1=0.144$,其余系数 $|Z|<0.04$,但仍然有少量第 3,7,10,15 项像差存在,但分解后得到的 x 方向倾斜像差 Z_1 是其中最主要像差。

图 4 是进一步计算得到的点扩展函数(PSF)和环围能量曲线,图 4(b)中曲线 1 为无像差光束(平行平面波)对应的环围能量,曲线 2 则与像差波面对应,横坐标为衍射极限。当腔内倾斜扰动量较大时,光

内相位扰动处引入量值为 $\lambda/16$ 相位倾斜扰动,耦合输出镜位于腔内凸面镜附近。采用迭代法求解谐振腔衍射积分方程。

图 2 给出了在腔内相位扰动平面处引入 $\lambda/16$ 倾斜像差后,腔内耦合输出光束相对强度及相位分布。

束模式中包含的高阶泽尼克像差会更为显著地增大。

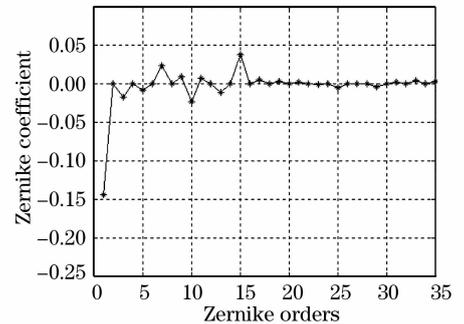


图 3 相位分布经波前拟合分解后的前 35 阶泽尼克像差系数

Fig. 3 Front 35-order Zernike coefficient by decomposing the aberrated wavefront

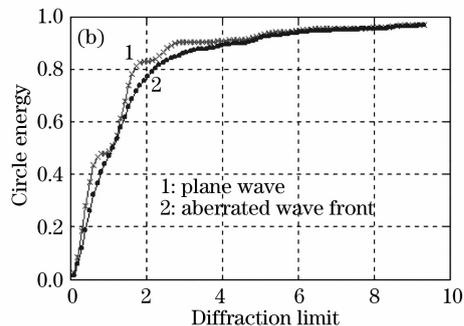
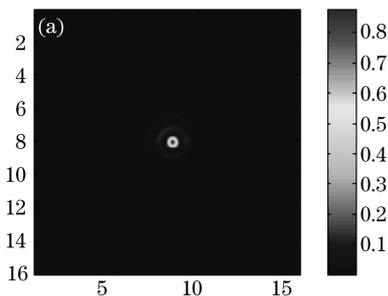


图 4 数值求解得到的点扩展函数分布(a)和环围能量曲线(b)

Fig. 4 Distribution of PSF (a) and the circle energy (b) for the perturbed positive-branch confocal resonator

2.3 模式法波前重构

哈特曼-夏克波前传感器^[9]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。目前已应用于波前像差校正和光束特性测量等领域。CCD 得到的是光斑强度点阵分布,必须采用一定的数学方法进行相位

复原或重构。常用的波前重构方法是泽尼克模式法和区域法,模式法由 R. Cubalchini^[10]于1979年首先提出;即入射光束波前相位畸变 $\phi(x,y)$ 可用模式函数系列 $F_k(x,y)$ 展开

$$\phi(x,y) = \sum_{k=1}^l a_k \cdot F_k(x,y), \quad (5)$$

$$G_{jx} = \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[\frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x} \right]_j dx dy = \sum_{k=1}^l \left(\frac{a_k}{s_j} \right) \iint_{s_j} \left[\frac{\partial F_k(x,y)}{\partial x} \right]_j dx dy = \sum_{k=1}^l a_k F_{jkx}, \quad (6)$$

$$G_{jy} = \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[\frac{\partial \phi(x,y)}{\partial y} \right]_j dx dy = \sum_{k=1}^l \left(\frac{a_k}{s_j} \right) \iint_{s_j} \left[\frac{\partial F_k(x,y)}{\partial y} \right]_j dx dy = \sum_{k=1}^l a_k F_{jky}, \quad (7)$$

式中 s_j 表示第 j 个子孔径的面积,并且有

$$F_{jkx} = \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[\frac{\partial F_k(x,y)}{\partial x} \right]_j dx dy, \quad (8)$$

$$F_{jky} = \frac{1}{s_j} \iint_{s_j} \left[\frac{\partial F_k(x,y)}{\partial y} \right]_j dx dy,$$

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

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

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{F} 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{F} 的广义逆 \mathbf{F}^+ ,就可以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

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

将(10)式计算得到的模式函数系数向量 \mathbf{A} 代入(5)

式中 l 为模式数; a_k 为待定的各模式系数。模式法波前重构的实质是建立模式函数系列 $F_k(x,y)$ 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

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。

3 实验

3.1 实验光路

对于包含增益的实际激光器系统,增益介质不均匀或发生畸变,腔镜机械结构不稳定及腔镜热变形等都会直接影响光束质量。为简化问题,本文首先针对无源正支共焦腔研究。图5为分析腔内扰动与腔外像差关系和腔内倾斜像差控制实验装置。其中非稳腔由凹、凸腔镜,平面反射镜组和刮刀镜构成,主要参量为:腔长 L 为6.75 m,凸镜半口径 a 为12.5 mm,调腔光波长为 $0.6328 \mu\text{m}$,凸镜曲率半径 R_1 为7.5 m,凹镜曲率半径 R_2 为21.0 m,谐振腔放大率为2.8,腔内扰动分别以凹镜和凸镜引入。反射镜1开有约 $\phi 1.5 \text{ mm}$ 的小孔以引入He-Ne调腔光来检查谐振腔光路的共轴性,光束在腔内传输扩束由 45° 放置的刮刀镜输出腔外,采用子孔径数 32×32

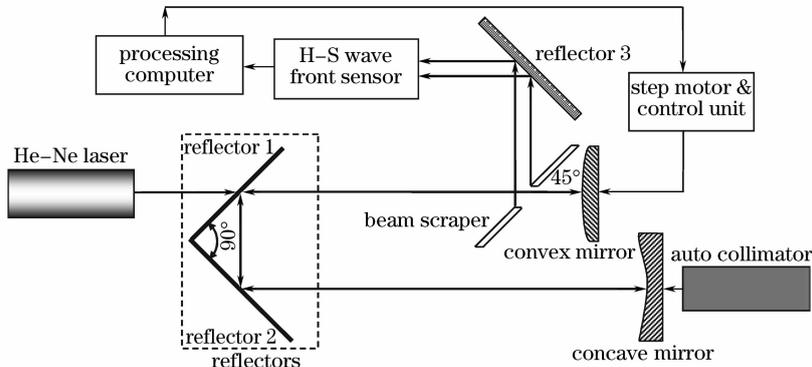
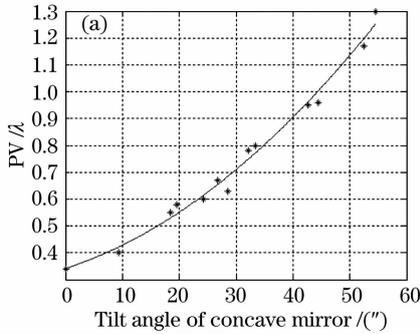


图5 腔内像差扰动定量测定和像差校正实验装置图

的哈特曼-夏克波前传感器在刮刀镜位置对环形光束近场像差进行探测,并采用模式法进行波前重构,可以得到各阶像差泽尼克系数,进一步计算还可得斯特雷尔(Strehl)比,点扩展函数分布等光束质量评定指标,从而可以全面了解输出光束质量。

3.2 实验结果

文献[11]对实际系统用非稳腔做了腔内倾斜扰动与腔外光束像差二者关系的定量测定。表明对大 N_{eq} 值的无源正支共焦腔,腔镜倾斜扰动量与腔外耦合输出光束泽尼克倾斜像差系数呈较好的线性关系,



且输出光束中的低阶倾斜像差明显大于高阶像差。这对建立腔内倾斜扰动自动校正系统时控制算法的选取提供了参考。图6给出了输出He-Ne调腔光波前相位的峰值和均方根(单位为波长)与凹镜倾斜扰动量关系,采用最小二乘进行了拟合。其中波前畸变峰值定义为波面相位中的最大值与最小值之差;

均方根定义为 $\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)}$;其中 n 为波面相位采样点数, y_i 为波面畸变量值, \bar{y} 为其平均值。

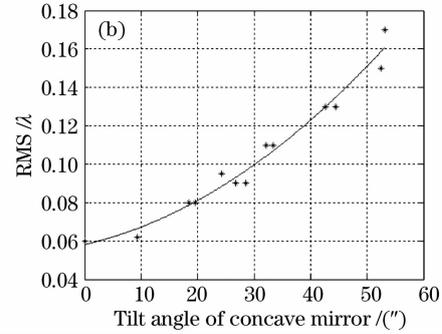


图6 凹镜倾斜扰动对耦合输出光束相位峰值(a)和均方根(b)值的影响

Fig. 6 PV and RMS value of the output beam phase for intracavity phase-tilted perturbation

4 腔内倾斜像差校正实验

在理论分析和实验研究基础上,完成了以控制腔内倾斜像差的自动控制系统,针对腔内凸面镜进行控制,目地在于校正由于腔内扰动带来的低阶像差。由于实验条件所限,首先针对He-Ne调腔光做了原理性实验,即研究无源正支共焦腔。

实验光路仍如图5,其中控制系统由正支共焦腔、哈特曼-夏克波前传感器、数据处理和控制计算机,步进电机及其控制器构成,控制目标为耦合输出的He-Ne激光光束。

图7~图9给出了初步实验结果。其中,在谐振腔光路中施加一定性微扰:即实验平台轻微振动并且在光路中用风扇吹气,施加气流扰动。以实验所用谐振腔较长的非稳腔而言,对气流的扰动、腔镜结构不稳定等扰动十分灵敏。以光腔完全调整共轴时的状态作为标定状态(输出光束强度呈轴对称均匀分布,且波面像差较小)。采集速度为25 frame/s,采用泽尼克模式法进行波前重构。

图7为腔内施加像差扰动后的情形,可见其中的 Z_2 系数(y 方向倾斜)达到1.867;高阶像差中增加显著的有 Z_3 为-0.125; Z_4 为0.162,以及 Z_5 ,

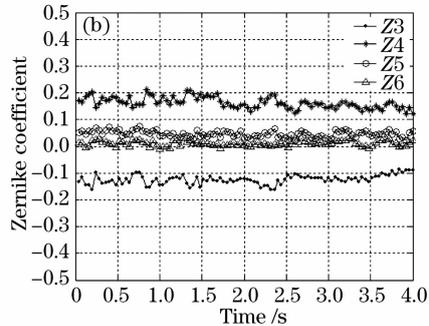
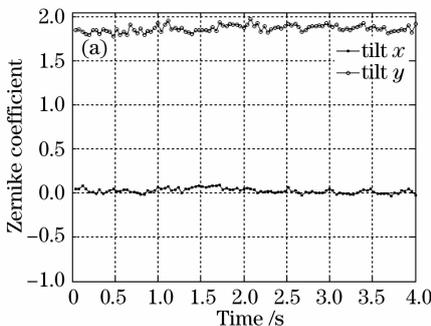


图7 光路施加扰动时输出光束的 Z_1 和 Z_2 像差(a), $Z_3 \sim Z_6$ 像差(b)随时间变化曲线

Fig. 7 Experimental measuring results for tilt perturbation. (a) Z_1 and Z_2 Zernike aberration,

(b) $Z_3 \sim Z_6$ Zernike aberration

Z_9, Z_{10} 等。针对图7状态,图8给出了对腔内凸镜进行连续闭环后的结果。可见其中的泽尼克系数 Z_2 明显减小,为 -0.029 ;高阶像差中的 Z_3 和 Z_4 系数分别为 -0.011 和 0.008 , Z_5, Z_9, Z_{10} 阶像差相比腔内施加像差扰动时情形也有减小。因此控制系统对腔内倾斜像差的校正效果非常明显。

图9(a),(b)对比了闭环前后输出光束的峰值和均方根值随时间变化曲线,施加扰动时输出光束波面峰值平均值为 1.397λ ,均方根平均值为

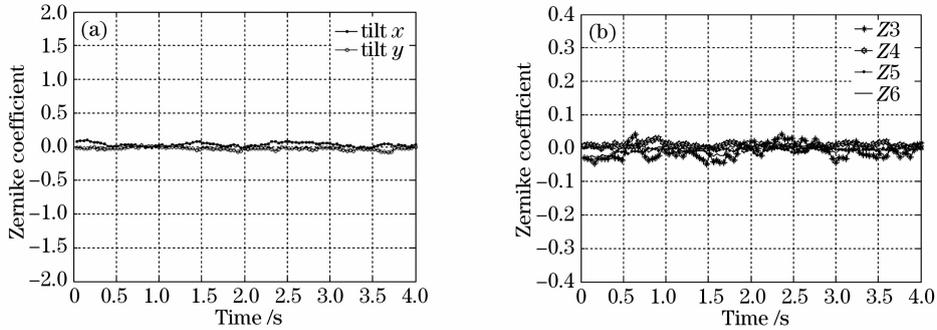


图8 凸镜连续闭环校正时输出光束的 Z_1 和 Z_2 像差(a), $Z_3 \sim Z_6$ 像差(b)随时间变化曲线

Fig. 8 Experimental correction result for continuous closed-loop of the convex mirror. (a) Z_1 and Z_2 Zernike aberration, (b) $Z_3 \sim Z_6$ Zernike aberration

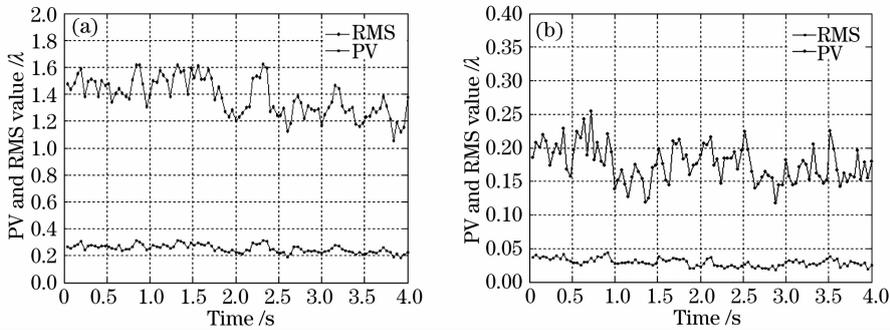


图9 光路施加扰动时(a)与腔内凸镜连续闭环时(b)输出光束的峰值和均方根值

Fig. 9 PV and RMS of the output laser beam. (a) Intracavity perturbation, (b) continuous closed-loop for the convex mirror

表1 施加扰动和凸镜连续闭环后输出光束的前10阶泽尼克像差系数

Table 1 Comparison of Zernike coefficient for intracavity perturbation and close-loop for convex mirror

Zernike coefficient	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}
Perturbation	0.027	1.867	-0.125	0.162	0.046	0.011	-0.010	-0.017	0.060	-0.030
Closed-loop for the convex mirror	0.031	-0.029	-0.011	0.008	-0.005	-0.0004	0.003	0.0005	-0.0019	0.010

5 结 论

研究了腔镜倾斜扰动对无源正支共焦腔模式的影响,结果表明当引入腔内倾斜扰动时,腔内耦合输出光束强度及相位分布呈现非均匀性。通过对输出相位进行泽尼克像差拟合分解结果表明,相位面中的低阶泽尼克像差是其中主要像差,但还包含一些

0.255λ ;这时计算出的光束平均斯特雷尔比小于 0.45 。进行腔内像差校正后输出光束波面峰值平均值为 0.179λ ,均方根平均值为 0.029λ ;并且光束平均斯特雷尔比增大到 0.9 以上。

为便于比较,表1给出了腔内施加扰动和对凸镜连续闭环时输出光束的前10阶泽尼克像差即 $Z_1 \sim Z_{10}$ 之值,表中结果为100 frame数据的平均值。从而可以反映校正前后光束中各阶像差的变化情况。

泽尼克像差高阶成分,如离焦、像散和慧差等。在倾斜扰动增大的同时还将导致输出波前中的高阶像差进一步增大,从而严重降低输出光束质量。

腔内倾斜像差校正实验表明,可以通过采用哈特曼-夏克波前传感器进行光束近场波前探测和重构,并以直接控制腔镜的方式进行腔内低阶像差校

正,提高输出光束质量。对由谐振腔镜构成的闭环系统,当腔内扰动变化频率较低或准静态情况,系统对腔内倾斜像差校正结果较好,当泽尼克低阶倾斜像差减小的同时一些高阶像差也得以减小。进一步可以考虑采用腔内高速倾斜镜和变形镜分别校正变化较快的腔内倾斜和高阶像差,并提高系统带宽,但需选择合适的控制算法,这是实际腔内校正需解决的难点问题。

参 考 文 献

- 1 Edward A. Sziklas, A. E. Siegman. Mode calculations in unstable resonators with flowing saturable gain. 2: fast Fourier transform method[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(8): 1875~1889
- 2 Ku Geng, Cheng Zuhai, Zhu Songlin *et al.*. Numerical study of effect of the mirror distortion on the oscillatory mode variation of stable resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1997, **9**(3): 447~449
库 耕,程祖海,朱松林等. 腔镜变形对平凹稳腔激光振荡模式影响的数值研究[J]. *强激光与粒子束*, 1997, **9**(3): 447~449
- 3 Wang Ning, Lu Yutian. Sensitivity to mirror tilt of off-axis hybrid resonator for innoslab [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1593~1598
王 宁,陆雨田. 部分端面抽运板条激光器腔镜倾斜问题研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1593~1598
- 4 Tian Laike, Yao Hebao, Yang Zhiyong *et al.*. Influence and compensation of heat distortion to positive-branch unstable resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 754~757
田来科,姚合宝,杨志勇等. 热畸变对正分支非稳腔的影响及补偿[J]. *光子学报*, 2002, **31**(6): 754~757
- 5 D. Anafi, J. M. Spinhirne, R. H. Freeman *et al.*. Intracavity adaptive optics. 2: tilt correction performance[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(11): 1926~1932
- 6 Zhang Xiang, Xu Bing. Numerical simulation for positive-branch confocal unstable resonator [J]. *Opto-Electronics Engineering*, 2003, **30**(5): 4~6
张 翔,许 冰. 正支共焦非稳激光谐振腔的数值模拟[J]. *光电工程*, 2003, **30**(5): 4~6
- 7 A. E. Siegman, H. Y. Miller. Unstable optical resonator loss calculations using the prony method [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(12): 2729~2736
- 8 K. E. Oughstun. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations. I: analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7): 862~872
- 9 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Yu Xin *et al.*. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defence Press, 1996. 121~138
周仁忠,阎吉祥,俞 信等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 121~138
- 10 R. Cubalchini. Modal wave-front estimation from phase derivative measurements [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1979, **69**(7): 972~977
- 11 Zhang Xiang, Xu Bing, Yang Wei. Influence on outcoupled mode by introducing intracavity mirror tilt perturbation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 303~310
张 翔,许 冰,杨 伟. 腔镜倾斜扰动对正支共焦腔输出光束模式的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 303~310