

文章编号: 0258-7025(2006)03-0303-08

# 腔镜倾斜扰动对正支共焦腔输出光束模式的影响

张翔<sup>1,2</sup>, 许冰<sup>1</sup>, 杨伟<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 针对激光器出光过程中腔内像差扰动带来的光束质量下降问题, 分析了正支共焦腔镜倾斜扰动对调腔光模式的影响, 采用等效透镜波导法计算了凹、凸腔镜倾斜失调状态下的调腔光模式分布、泽尼克(Zernike)像差系数。同时采用哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器方法对此进行了实验定量研究, 用模式法进行了波前重构。得到了扰动量与泽尼克像差的定量关系。结果表明, 凹镜倾斜扰动对腔模的影响大于凸镜, 对于大菲涅耳数非稳腔, 腔内倾斜扰动量与腔外泽尼克倾斜系数具有良好的线性关系, 若对凹、凸腔镜分别施加等量倾斜扰动, 带来的腔外泽尼克倾斜系数比率约为光腔放大倍率。且腔模倾斜像差增加的同时还将导致离焦、像散等高阶像差的增大, 因此作腔内相位补偿或校正时, 应使补偿或校正平面尽可能靠近凹面镜; 最后对实际激光束与 He-Ne 调腔光束的异同作了简要比较。

**关键词** 信息光学; 腔内像差扰动; 正支共焦腔; 哈特曼-夏克波前传感器方法; 泽尼克像差

**中图分类号** TN 241 **文献标识码** A

## Influence on Outcoupled Mode by Introducing Intracavity Mirror Tilt Perturbation

ZHANG Xiang<sup>1,2</sup>, XU Bing<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** The result of influence on outcoupled mode by introducing intracavity mirror tilt-perturbation in positive-branch confocal resonator is analyzed. The intracavity mode distribution and its Zernike-aberration coefficient due to the concave or convex mirror tilt disadjustment are calculated by adopting equivalent lens method. At the same time, the experimental study about the relations of intracavity mirror tilt disadjustment and mode aberration has been performed by using Hartmann-Shack (H-S) wavefront sensor method. Aberrations of outcoupled beam mode are obtained by using mode-reconstitution method. The results show that the intracavity perturbation of concave mirror has a greater effect on outcoupled beam-quality compared with that of convex mirror. For the large Fresnel-number resonator, the tilt angle of intracavity mirror has a close linear relationship with extracavity Zernike tilt aberration coefficient. The ratio of Zernike tilt coefficient approaches to the magnification of unstable resonator if equivalent perturbation is applied to concave mirror and convex mirror respectively. Furthermore, astigmatism and defocus aberration are also increased with the augment of tilt aberration of beam mode. So intracavity phase-corrected elements used in unstable resonator should be close to the concave mirror. The wavefront relationship between the He-Ne laser and the actual laser beam has also been compared.

**Key words** information optics; intracavity perturbation; positive-branch confocal resonator; Hartmann-Shack wavefront sensor; Zernike aberration

收稿日期: 2005-05-30; 收到修改稿日期: 2005-09-09

作者简介: 张翔(1976—), 男, 四川成都人, 中国科学院光电技术研究所博士研究生, 主要从事自适应光学和激光技术研究。E-mail: zhanghk23@yahoo.com.cn

## 1 引 言

激光器出光时腔内的各种扰动,如增益密度不均匀、腔镜变形<sup>[1]</sup>、工作物质热效应<sup>[2~5]</sup>和腔镜失调<sup>[6]</sup>等都会影响腔模分布,带来输出光束质量的下降。对于采用正支共焦非稳腔结构的激光器,目前实验发现腔内倾斜是影响输出光束质量的重要因素之一,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,严重影响光束质量。1978年美国 R. H. Freeman 等研究腔内像差自适应校正时发现,对采用正支共焦腔的 CO<sub>2</sub> 激光器引入 2.61λ 倾斜像差和 0.62λ 的离焦至腔内时,激光器输出功率分别下降为 0.42(以光腔调整共轴时的输出功率为 1 个单位)和 0.35,采用一个 5 单元变形镜进行腔内校正后,则输出功率分别提升至 0.88 和 0.90<sup>[7]</sup>;1981 年 D. Anafi 等研究腔内倾斜像差校正时,当引入 0.22λ 和 0.44λ 的静态倾斜像差时,输出功率分别下降至 0.77 和 0.56。同时发现当腔内倾斜扰动增大到一定量值时,采用爬山法原理(COAT)的腔内自适应像差校正是失败的<sup>[8]</sup>。腔内倾斜扰动对模式分布的影响有人作过研究<sup>[9,10]</sup>,但并未将波面像差拟合细分为各阶泽尼克(Zernike)像差,未说明低阶像差的增大对于高阶像差的影响。

本文针对正支共焦腔内扰动对光束模式的影响进行了理论分析,指出在腔内不同位置引入扰动,对光腔模式的影响不同,进一步得到了定量实验关系,并指出进行腔内像差补偿应注意的问题。为相关研究提供了一种分析和实验方法。

## 2 理论分析

### 2.1 正支共焦腔等价传输线系统

由几何光学理论可知,在球面反射镜曲率半径远大于其镜面横向尺寸时,该球面反射镜可以等价于一个薄透镜。等价薄透镜焦距与球面镜焦距相同并且为  $f = R/2$ 。这种由光学元件组成的周期序列又称光学波导或光学传输线。通过这种方法可以考虑光腔的稳定或非稳定问题,腔内共振光束的包络线及发散角问题等。图 1(a)所示为一面凸镜和凹镜构成的正支共焦腔。设凸、凹腔镜的曲率半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ ,腔长为  $L$ 。把它考虑为透镜序列时,每个反射镜分别等价于焦距为  $f_1 = R_1/2$  和  $f_2 = R_2/2$  的透镜,两透镜间距为  $L$ ,那么非稳腔可以等

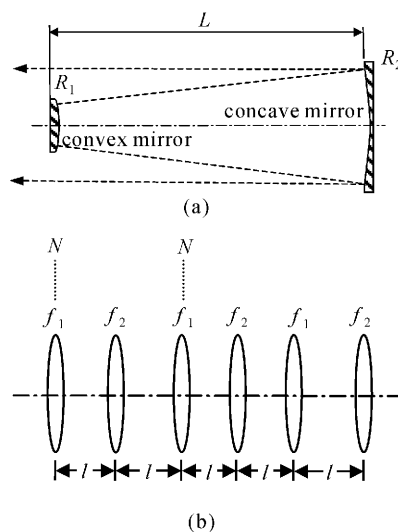


图 1 正支共焦腔结构(a)及其等价传输线系统(b)  
Fig. 1 Positive-branch confocal resonator (a) and equivalent transmitting lens structure (b)

效为一系列的传输透镜形式如图 1(b) 所示。设参考平面  $N$  与焦距为  $f_1$  的透镜面重合,则穿过等价传输线一个周期过程中的传输矩阵可写为

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -f_2^{-1} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -f_1^{-1} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - Lf_1^{-1} - Lf_2^{-1} & L(2 - Lf_2^{-1}) \\ -f^{-1} & 1 - Lf_2^{-1} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中  $f$  定义为:  $1/f = 1/f_1 + 1/f_2 - L/f_1f_2$ ; 满足条件  $(A+D)/2 > 1$  的光腔即为正支共焦腔。该变换作用的本征值和本征函数分别用  $\gamma$  和  $\varphi$  表示,它们满足本征方程

$$\mathbf{T}\varphi = \gamma\varphi, \quad (2)$$

对于旁轴光线,在轴对称条件下,变换作用可由  $2 \times 2$  的变换矩阵  $\mathbf{T}$  表示,(2) 式可进一步表示为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \theta \end{pmatrix},$$

或者

$$\begin{pmatrix} A - \gamma & B \\ C & D - \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma \\ \theta \end{pmatrix} = 0, \quad (3)$$

光学系统变换矩阵满足  $AD - BC = 1$ ; 则本征值  $\gamma$  满足方程:  $\gamma^2 - (A+D)\gamma + 1 = 0$ ; 本征函数满足方程

$$\begin{cases} (A - \gamma)r + B\theta = 0 \\ Cr + (D - \gamma)\theta = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

只要根据  $\gamma$  取值的不同情况,求解上述方程,即可对

相应的本征模式进行讨论。对于腔镜倾斜失调情况, 可以用失调增广矩阵表达<sup>[11]</sup>。采用  $4 \times 4$  的失调增广矩阵即可以处理光线在失调光学系统中的传输问题。

对于增益介质热效应(如热透镜效应)造成的影响, 可将其等效为焦距为  $f_T$  的透镜, 透镜距腔镜  $M_1, M_2$  的距离分别为  $l_1, l_2$ , 则其腔内传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -f_T^{-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - l_2/f_T & l_1 + l_2 - l_1 l_2/f_T \\ -1/f_T & 1 - l_1/f_T \end{pmatrix}, \quad (5)$$

等效热透镜参量为

$$\begin{cases} g_1 = a - b/R_1 = 1 - l_2/f_T - R_1^{-1}(l_1 + l_2 - l_1 l_2/f_T) = 1 - L/R'_1 \\ g_2 = d - b/R_2 = 1 - l_2/f_T - R_2^{-1}(l_1 + l_2 - l_1 l_2/f_T) = 1 - L/R'_2, \\ L = l_1 + l_2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} R'_1 = (1/R_1 + l_2/f_T L - l_1 l_2/f_T L R_1)^{-1} = R_1/[1 + (R_1 l_2 - l_1 l_2)/f_T L] \\ R'_2 = R_2/[1 + (R_2 l_2 - l_1 l_2)/f_T L] \end{cases}, \quad (7)$$

若热透镜处于谐振腔中心位置, 则  $l_1 = l_2 = L/2$ , 此时

$$\begin{cases} R'_1 = R_1/[1 + (R_1 - L/2)/2f_T] \\ R'_2 = R_2/[1 + (R_2 - L/2)/2f_T] \end{cases}, \quad (8)$$

由(7), (8)两式可看出, 由于热透镜效应影响, 决定激光束参量的谐振腔等效结构已发生了改变。原来为正支非稳腔, 输出为平面光波。现由于热效应影响等效腔  $R'_1 \neq R_1, R'_2 \neq R_2$ , 已偏离了正支共焦非稳腔。且热效应愈严重, 则  $f_T$  愈小,  $R'_1, R'_2$  偏离  $R_1, R_2$  愈大, 反之亦然。当热效应可以忽略时,  $f_T \rightarrow \infty$ , 则

由(7), (8)式可得  $R'_1 = R_1, R'_2 = R_2$ 。即激光腔等效结构随着增益介质热畸变效应的变化而改变。对于虚共焦腔, 若  $R_1 > 0, R_2 < 0$ , 当  $1 + (R_2 - L/2)/2f_T < 0$  时,  $R'_2 > 0, R'_2$  已成为凹面镜, 即这时决定光束参量的光腔结构都已发生改变, 显然增益介质对模式的影响已不能忽略。

也可以采用迭代法进行计算, A. E. Siegman 等将光线在无扰动非稳腔中的传输过程等效为两个积分方程<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} \gamma_1 \varphi_1(x) &= j^{t+1} (k/L_1) \int_0^{a_2} y J_t(kxy/L_1) \exp[-j(k/2L) \times (g_1 x^2 + g_2 y^2)] \varphi_2(y) dy \\ \gamma_2 \varphi_2(x) &= j^{t+1} (k/L_1) \int_0^{a_1} z J_t(kyz/L_1) \exp[-j(k/2L_1) \times (g_2 y^2 + g_1 z^2)] \varphi_1(z) dz, \end{aligned} \quad (9)$$

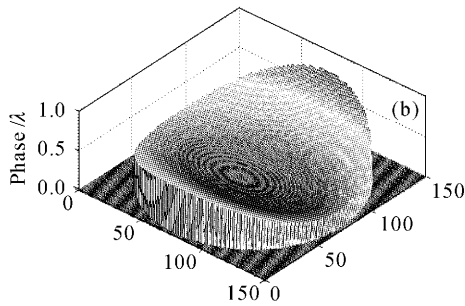
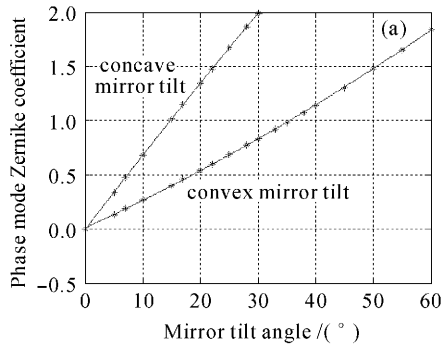
其中  $a_1$  为凸镜半口径,  $a_2$  为凹镜半口径。而存在腔内倾斜扰动的非稳腔满足的积分方程见文献[13]。

## 2.2 计算条件和结果分析

使用的正支共焦腔腔长  $L = 6750$  mm, 凸镜半口径  $a = 12.5$  mm, 谐振腔放大率  $M = 2.8$ , 调腔光波长为  $0.6328 \mu\text{m}$ , 凸镜曲率半径  $R_1 = 7500$  mm。凹镜曲率半径  $R_2 = 21000$  mm,  $N_{\text{eq}} = \frac{M^2 - 1}{2M} \frac{a^2}{\lambda L} = 44.7$ , 分别以凹镜和凸镜作为相位扰动面。可以对图 1(b)所示的等效透镜传输系统按几何光学中光线追迹方式, 将非稳腔中的凸面镜等效为一个凹透镜, 将凹面镜等效为一个凸透镜, 等效薄透镜焦距与球面镜焦距相同并且为  $f = R/2$ 。

由于激光输出模式是一个自再现过程, 若采用光线追迹法, 作数值计算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  $\varphi_n$  为第  $n$  次传输到凸镜时的光场分布, 则应使  $\varphi_{n+1}/\varphi_n$  为复常数因子。计算中设初始波前为直径  $D = 1.5$  mm 的高斯光束。计算出稳定光场时的波面相位再拟合分解出前 35 阶泽尼克像差系数。在本系统中 He-Ne 激光在光腔中的往返次数约为 6 次(光束由凹镜传播至凸镜再到凹镜称为一个往返)。理论计算结果如图 2 所示, (a)为腔镜失调量(腔镜倾斜)与腔模相位拟合后的泽尼克像差系数  $Z_1(x$  方向倾斜)的关系; (b)为凹镜倾斜  $30''$  时的腔模相位分布。可见对于大菲涅耳数  $N_{\text{eq}}$  腔长较长的非稳腔而言, 二者表现为良好的线性关系。若分别对腔镜施加等量扰动时, 凹镜对腔模的影响明显大于凸镜。其次, 若腔镜倾斜扰动量较大时, 还会带来高阶像差的增大, 譬如图 2(b)中, 凹镜倾斜角为  $30''$  时, 腔模相位中的  $Z_3$  系数(离焦)达到  $0.095, Z_5$  (低阶像散)为  $-0.067$ 。



$Z_3 = 0.095; Z_5 = -0.067; Z_6 = 0.010$  tilt angle =  $30''$

图 2 腔镜失调量与光束相位畸变的泽尼克系数  $Z_1$  间关系(a)和凹镜失调后的光束相位(b)

Fig. 2 Relation between the disturbance of intracavity concave mirror and convex mirror and Zernike aberration coefficient by numerical calculation (a) and mode phase distribution (b)

### 3 腔镜扰动对非稳腔输出光束质量的影响

#### 3.1 实验光路及相关说明

对于实际采用的非稳腔化学氧碘激光器,其化学反应系统结构十分复杂,实际出光时谐振腔内超音速横流气体的影响、增益介质的不均匀性和各类畸变,腔镜机械结构不稳及腔镜热变形等都会直接影响光束质量。为简单起见,研究首先针对无源正支共焦腔。实验装置如图 3 所示。其中凹、凸腔镜,  $45^\circ$ 反射镜组和耦合输出镜共同构成正支共焦非稳腔。反射镜 1 上开有约  $\phi 1.5$  mm 的小孔,用以引入 He-Ne 调腔光来检查光腔工作状态。He-Ne 准直光与实际激光束间是存在某些一致性的,因此已经在实际系统中广泛使用。光束在腔内振荡稳定后由一个倾斜放置的耦合输出镜输出腔外,采用子孔径数为  $32 \times 32$  的哈特曼-夏克(Hartmann-shack, H-S)波前传感器对光束近场像差进行测量(环形光束),并采用模式法进行光束波前重构,可以得到各阶像差泽尼克系数,进一步计算还可得斯垂耳

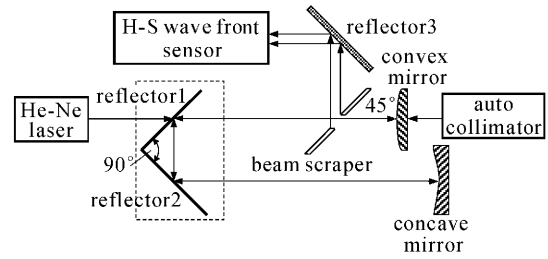


图 3 腔内像差扰动定量测定实验光路布置  
Fig. 3 Experiment setup of the intracavity mirror disturbance measurement

(Strehl)比,点扩展函数(PSF)分布等光束质量评价指标。采用精度为  $0.1''$  的自准直仪测量腔镜的扰动或失调量。

#### 3.2 哈特曼-夏克波前传感器原理和模式法波前重构

图 4 为哈特曼-夏克波前传感器基本原理。利用一个微透镜阵列将被测孔径分为许多子孔径,用 CCD 等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,即可求出全孔径波前的相位分布。在全孔径圆域内,泽尼克多项式波前重构算法将全孔径畸变波前  $\phi(x, y)$  展开为不同的模式分量,即表示为一系列正交多项式的线性组合

$$\phi(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k Z_k(x, y), \quad (10)$$

式中  $k$  为波前  $\phi(x, y)$  的第  $k$  阶模式;  $a_k$  为模式系数;  $Z_k(x, y)$  为第  $k$  阶模式的泽尼克多项式。前几项有明显的物理意义,以  $Z_k$  取  $k = 3, 5$  为例

$$z_3 = \sqrt{3}[2(x^2 + y^2) - 1] \quad (\text{离焦})$$

$$z_5 = \sqrt{6}(x^2 - y^2) \quad (\text{低阶像散})$$

实际计算时,波前的模式阶数一般取前 35 阶就可以较好地解决波前重构时各模式间的耦合和混淆影响,重构精度较高。由(10)式得到子孔径区域波前斜率向量  $G$  与波前传感器泽尼克模式斜率响应矩阵  $Z$  和相应模式系数向量  $A$  的关系式为

$$G = ZA, \quad (11)$$

其中  $G$  为  $2N$  行向量,  $Z$  的维数为  $2N \times K$ ,  $N$  为传感

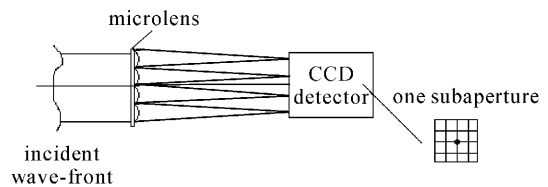


图 4 哈特曼-夏克波前传感器的基本原理  
Fig. 4 Schematic of Hartmann-Shack wavefront sensor

器的子孔径数。泽尼克模式斜率响应矩阵  $Z$  对特定结构的哈特曼 - 夏克传感器来说是确定的。由(11)式可知,只要实验测得斜率向量  $G$  就可以求得波前的模式系数  $A$ ,即

$$A = Z^+ G, \tag{12}$$

式中  $Z^+$  为  $Z$  的伪逆矩阵。求出  $A$  后,利用(10)式即可重构出待测波前分布。

### 3.3 实验结果和数据分析

图 5(a),(b)为实验测定结果,表示了腔镜倾斜扰动与腔外泽尼克像差中的  $Z_1$  像差( $x$  方向倾斜)间的关系。对实验数据作最小二乘拟合,结果如下:图 5(a)拟合曲线为  $y_1 = a_1x_1^2 + b_1x_1 + c_1$ ,其中的  $a_1, b_1, c_1$  分别为  $-0.0001, 0.0814, -0.0322$ ; 图 5(b)拟合曲线为  $y_2 = a_2x_2^2 + b_2x_2 + c_2$ ,其中的  $a_2, b_2, c_2$  分别为  $-0.0001, 0.0305, 0.0335$ 。可见其中  $b_1 \gg a_1, b_2 \gg a_2$ ,可以认为对大  $N_{eq}$  值的非稳腔,腔镜倾斜扰动量与腔外耦合输出光束的泽尼克像差系数  $Z_1$  呈现出较好的线性关系(图 5(b)曲线相比图 5(a)线性度较差在于凸镜背面的平面度略差于凹镜),这对于建立非稳腔内倾斜像差自动控制系统时控制算法的选取提供了参考。若凹镜带来的扰动大于  $53.1''$  时,大部分光斑会偏离出哈特曼-夏克传感器的子孔径,这时的光斑强度分布呈现出极大的

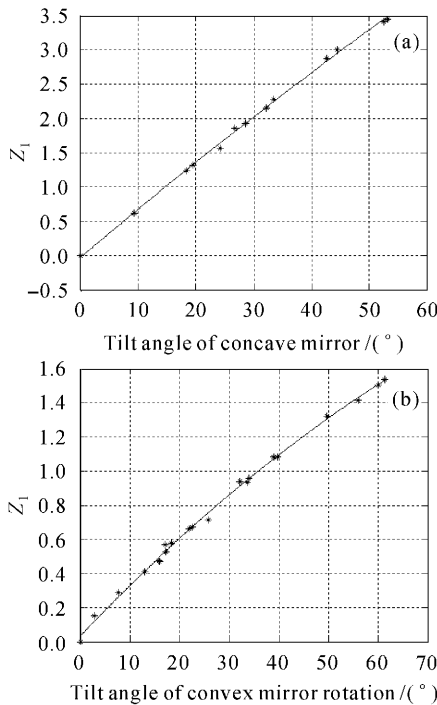


图 5 凹镜倾斜(a)和凸镜倾斜(b)对腔外  $Z_1$  像差的影响  
Fig. 5 Relation between concave mirror tilt (a), convex mirror tilt (b) and beam aberration  $Z_1$

不均匀,因此光腔调腔光模式已受到严重破坏,可近似认为腔内对腔镜倾斜扰动的容限度约为  $1'$ 。并且比较图 5(a),(b)曲线的斜率,二者之比约 2.67,而谐振腔的放大倍率为 2.8。可近似认为对  $N_{eq}$  值较大的非稳腔,凹、凸腔镜分别施加等量腔内倾斜扰动,耦合输出调腔光束中产生的倾斜像差比率约为谐振腔放大倍率。

图 5,6 表明了在出现腔镜扰动时,输出光束中的低阶倾斜像差 ( $Z_1$ ) 明显大于高阶像差 ( $Z_3 \sim Z_5$ );其次,虽然腔镜倾斜扰动量与腔外  $Z_1$  像差为较好的线性关系,但与高阶像差(如  $Z_3 \sim Z_5$ )的关系则呈现非线性。从图 7 可知,输出光束相位的峰谷值(PV)与凹镜倾斜扰动量之间呈现二次曲线分布(最小二乘拟合曲线为  $y_1 = ax_1^2 + bx_1 + c$ ;  $a, b, c$  分别为  $0.0002, 0.0069, 0.3415$ )。

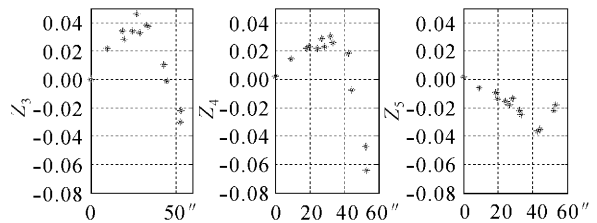


图 6 耦合输出光束模式的泽尼克像差 ( $Z_3 \sim Z_5$ ) 与凹镜倾斜扰动量的关系

Fig. 6 Relation between Zernike aberration ( $Z_3 \sim Z_5$ ) of outcoupled beam and tilt disturbance of concave mirror

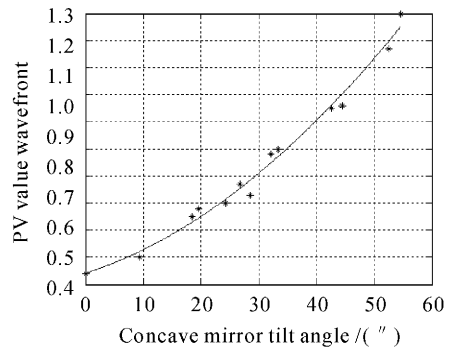


图 7 凹镜倾斜扰动对耦合输出光束相位峰谷值的影响

Fig. 7 Influence of concave mirror tilt on the peak to valley (PV) value of beam phase

图 8 表明(为反映腔内扰动对高阶像差的影响,波前重构时忽略低阶倾斜像差  $Z_1$  和  $Z_2$ ),当腔镜失调角为较小的  $9.4''$  时,波前畸变较小,峰谷值相对于参考波面(光腔校准共轴时的波面)为  $0.40\lambda$ ,随着失调量的增大,峰谷值逐渐增加,譬如当腔镜失调

角为  $52.4''$  时,波前畸变峰值已较大,达到  $1.17\lambda$ 。由计算后的斯垂耳比也可以看到由最初的  $0.76$  减小为  $0.20$ ,光束质量在不断下降。

图 9 为腔镜倾斜对输出光束强度分布的影响,由哈特曼-夏克波前传感器工作原理可知,探测到的光斑阵列图像强度分布可以粗略地代表光束强度分

布。当无扰动时光束强度分布比较均匀,倾斜量为  $21.6''$  时已呈现出均匀性,倾斜量为  $44.3''$  时光束强度已明显向一个方向偏移,且光强分布呈现一边强、一边弱的趋势。在实际系统中,这将会影响自适应光学系统的光束净化效果,也会影响哈特曼-夏克波前传感器正确稳定地进行波前探测。

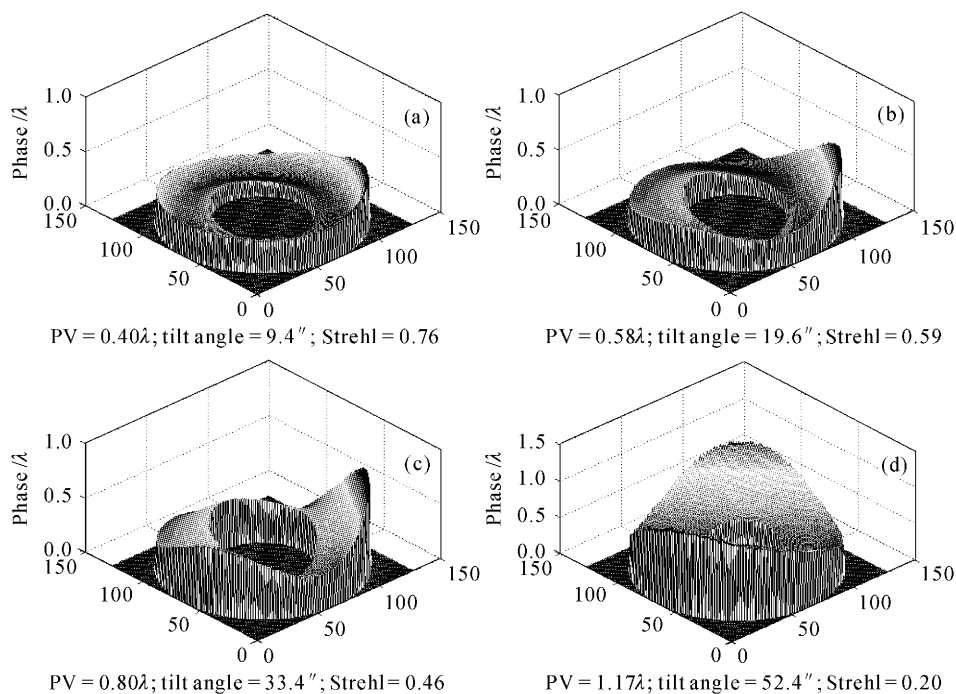


图 8 凹镜不同倾斜扰动量带来的输出光束相位模式的变化

Fig. 8 Outcoupled beam phase distribution with different intracavity concave mirror disturbance

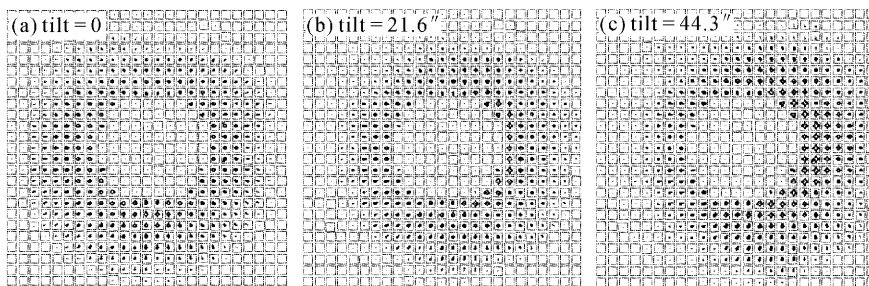


图 9 腔内凹镜不同扰动量时哈特曼-夏克传感器探测到的输出光束光斑点阵分布

Fig. 9 Beam intensity distribution measured by H-S sensor with different intracavity disturbance by concave mirror tilt

### 3.4 实际激光光束与 He-Ne 调腔光波前相位比较

图 10 比较了实际激光光束(波长  $1.315 \mu\text{m}$ )与 He-Ne 调腔光波前相位畸变的相似性(去除泽尼克倾斜分量)。激光器出光时间约为  $3\sim 4 \text{ s}$ 。定义残余波前误差  $T_n = \Delta_{\text{ncb}} / \Delta_{\text{nc}}$ ,其中  $\Delta_{\text{nc}}$  为第  $n$  帧实际激光光束光斑阵列图像的波前相位畸变均方根值, $\Delta_{\text{ncb}}$  为第  $n$  帧 He-Ne 调腔光光斑阵列图像与实际激光光斑阵列图像的波前相位畸变之差,即残余波前相

位的均方根值。 $T_n$  值越小,则实际激光光束与 He-Ne 调腔光波前畸变的相似性越好。研究发现,实际激光器刚输出激光时,相似性较小,但稍后 He-Ne 调腔光与实际激光光束波前相位畸变的形状相似,如图 10(a),(b)所示。统计结果发现残余波前误差  $T_n$  值主要在  $40\% \sim 60\%$  之间。

对此可作如下初步解释:一方面,He-Ne 调腔光与实际激光光束都是从正支共焦腔内耦合输出,

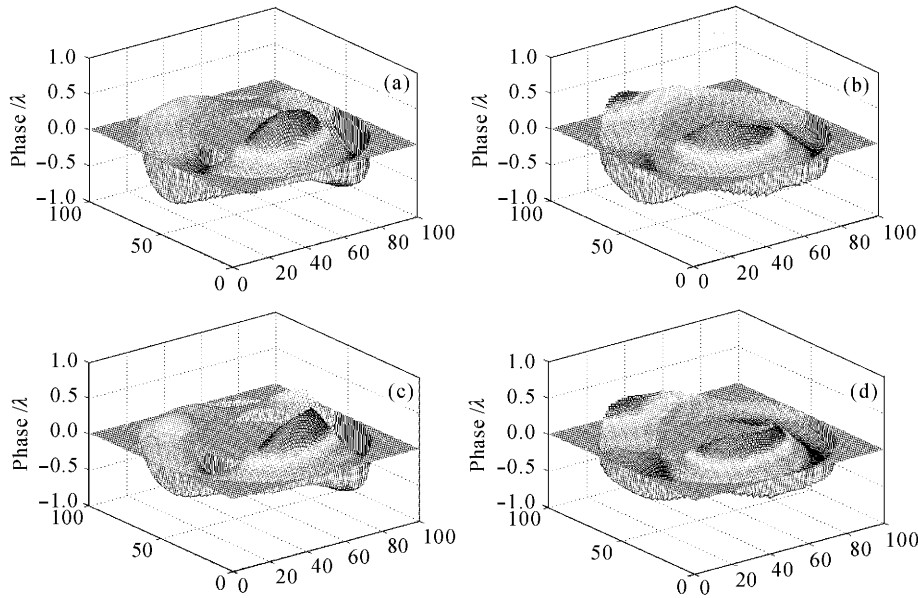


图 10 实际激光光束与 He-Ne 调腔光波前相位畸变(去除泽尼克倾斜分量)

实际激光器出光前期波前(出光时的第 1~2 s): (a) 实际激光光束(1.315  $\mu\text{m}$ ); (b) He-Ne 调腔光  
实际激光器出光期间平均波前(100 帧平均值): (c) 实际激光光束; (d) He-Ne 调腔光

Fig. 10 Wavefront comparison between the actual laser and He-Ne laser (excluding Zernike tilt component)

Wavefront of previous period for actual 1.315  $\mu\text{m}$  laser (at the 1st~2nd sec): (a) actual laser (1.315  $\mu\text{m}$ ); (b) He-Ne laser

Average wavefront of overall period (the average value for 100 images): (c) actual laser; (d) He-Ne laser

而且是同光路输出,所以 He-Ne 调腔光与实际激光光束波前相位畸变具有相似性;另一方面,He-Ne 调腔光与实际激光光束的波长存在差别,并且它们产生的过程不同,He-Ne 调腔光是在谐振腔内经过几次反射后输出的,而实际激光光束则是在激光谐振腔振荡产生,所以 He-Ne 调腔光与实际激光光束波前相位畸变相比具有差异性。因此,在针对此类激光器的光束净化自适应光学系统中,如果直接利用 He-Ne 调腔光作为信标,应该是有一定的光束净化效果,但最好是直接利用实际激光光束作为信标。

## 4 结 论

研究了腔镜倾斜扰动对于非稳腔调腔光模式的影响,引入了一种研究非稳腔腔内像差的实验方法,即采用哈特曼-夏克波前传感器在耦合输出镜附近对光束近场像差进行测量,采用模式法进行光束相位波前重构。结果表明对于大菲涅耳数非稳腔,腔内倾斜扰动量与输出腔外光束的倾斜泽尼克像差系数具有良好的线性关系,并且凹镜倾斜扰动对于腔模的影响明显大于凸镜,这对建立非稳腔腔内倾斜像差自动校正系统时控制算法的选取提供了参考。若对凹、凸腔镜施加等量倾斜扰动,造成的腔外倾斜

泽尼克像差系数比率约为光腔放大倍率。同时在腔模倾斜像差增大的同时还将导致离焦、像散等高阶像差的增大。因此可以考虑采用单独光学器件对腔内的倾斜像差进行校正,校正平面要尽可能靠近凹面镜或直接使用凹面镜作为相位校正面,在腔内就可能以一个微小量补偿腔外探测到的较大的某一阶像差,这也是腔内校正技术相比于腔外自适应技术的优点之一;由于光束在腔内为一个反复传输或振荡过程,因而扰动在腔内会得以放大,并且扰动量和泽尼克高阶像差一般为非线性关系,因此作腔内校正时控制算法的选取则至关重要。通过以上的分析,可以对进一步建立腔内像差自动控制系统提供参考。基于以上结论,目前已展开针对 He-Ne 调腔光的腔内倾斜像差自动控制系统的研究,结果将另文报道。

## 参 考 文 献

- 1 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

- 2 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
- 3 Zheng Jiaan, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Influence of thermal effect in gain-media on optimum design of LD-end pumped solid state laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(6):724~729  
郑加安,赵圣之,王青圃等.晶体热效应对LD端面泵浦固体激光器优化设计的影响[J].*光子学报*, 2001, **30**(6):724~729
- 4 Hou Xueyuan, Sun Yuming, Li Yufei *et al.*. Two rods series connection Nd<sup>3+</sup>:YAG lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(6):757~760  
侯学元,孙渝明,李宇飞等.双棒串接Nd<sup>3+</sup>:YAG激光器[J].*光子学报*, 2001, **30**(6):757~760
- 5 Wang Ning, Lu Yutian, Kong Yong. Analysing the light intensity distribution of super-Gaussian mirror resonator by fast Fourier-transform [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1317~1322  
王宁,陆雨田,孔勇.用快速傅里叶变换法分析超高斯反射镜腔的光场分布[J].*中国激光*, 2004, **31**(11):1317~1322
- 6 Liu Wenguang, Lu Qisheng, Liu Zejin. Misalignment characteristic analysis beam-converting annular resonant cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):803~809  
刘文广,陆启生,刘泽金.光束变换环形孔径谐振腔的失调特性分析[J].*中国激光*, 2005, **32**(6):803~809
- 7 R. H. Freeman, R. J. Freiberg, H. R. Garcia. Adaptive laser resonator [J]. *Opt. Lett.*, 1978, **2**(3):61~63
- 8 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
- 9 Robert L. Sanderson, William Streifer. Laser resonators with tilted reflectors [J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(11):2241~2248
- 10 Fu Lei, Shi Hongmin, Zhang Lingxiang *et al.*. Simulation of the alignment and misalignment of an unstable resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):709~713  
傅雷,史红民,张玲香等.非稳腔准直和失调影响的计算机仿真[J].*中国激光*, 2001, **A28**(8):709~713
- 11 Lu Yaxiong, Yang Yapei, Chen Shufen. The Transmission and Transform Technology of Laser Beam [M]. First ed.. Chengdu: UESTC Press, 1999. 32~37  
卢亚雄,杨亚培,陈淑芬.激光束传输与变换技术[M].第一版.成都:电子科技大学出版社,1999. 32~37
- 12 A. E. Siegman, H. Y. Miller. Unstable optical resonator loss calculations using the prony method [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(12):2729~2735
- 13 Kurt Edmund Oughstun. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberration. I: Analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7):862~872