

外腔镜非线性运动对激光回馈应力测量系统精度的影响及修正

牛海莎 牛燕雄 刘宁 刘雯文 王彩丽

Correction of error induced by nonlinear movement of feedback mirror in laser feedback stress measurement system

Niu Hai-Sha Niu Yan-Xiong Liu Ning Liu Wen-Wen Wang Cai-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 084208 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于直接驱动的快速变焦新方案

[A novel fast zooming scheme for direct-driven laser fusion](#)

物理学报.2015, 64(5): 054209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054209>

一种超快时间分辨速度干涉仪的设计和理论研究

[Design and theoretical research of an ultrafast time-resolved velocity interferometer](#)

物理学报.2014, 63(6): 060703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060703>

软 X 射线双频光栅剪切干涉法研究

[Studies on soft X-ray shearing interferometry with double-frequency gratings](#)

物理学报.2013, 62(7): 070703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.070703>

单光子调制锁定 Fabry-Perot 腔

[Fabry-Perot cavity locked by using single photon modulation](#)

物理学报.2012, 61(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.204203>

基于多路复用体全息光栅的角度放大器设计

[Design of angular magnifier based on multiplexed volume holographic grating](#)

物理学报.2012, 61(6): 064216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.064216>

外腔镜非线性运动对激光回馈应力测量系统精度的影响及修正^{*}

牛海莎 牛燕雄[†] 刘宁 刘雯文 王彩丽

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

(2014年8月5日收到; 2014年10月17日收到修改稿)

基于激光的回馈效应可实现光学材料应力分布的测量, 而系统外腔镜的非线性运动会引起测量结果的误差, 影响系统的精度. 利用高精度 Nd:YAG 激光回馈干涉仪对外腔镜的位移随时间的变化进行测量, 采用高次拟合的方式得到位移与时间函数关系, 并利用三镜腔等效模型的调谐曲线方程, 对非线性运动引入的应力测量误差进行计算, 实现对系统精度的修正. 结果表明: 外腔镜运动方向不同, 引起的误差呈现相反的变化趋势; 将不同方向的测量结果进行平均, 可减小系统的测量误差. 分析了外腔镜非线性运动带来的误差对系统测量精度的影响, 提出了测量误差修正方法, 对提高系统的测量精度具有重要意义.

关键词: 激光回馈, 非线性修正, 位移测量

PACS: 42.79.-e, 07.60.Ly, 06.30.Bp

DOI: 10.7498/aps.64.084208

1 引言

光学材料的内应力影响材料的均匀性及光学系统的成像质量. 由于产生应力的原因复杂, 其分布难以利用理论方式进行分析 and 计算, 通常采用测量方法获得. 目前, 应力测量在航空航天、精密光学系统^[1]、晶体光学^[2,3]、精密加工等领域具有重要应用, 常用方法主要包括: 干涉色法^[4], Senarmont 补偿法^[5], Tardy 法^[6], Babinet 补偿器法^[7]等. 干涉色法是利用光学材料对不同波长的光产生的不同双折射相位差, 经过检偏振器后形成不同的干涉色, 通过查表与标准色对比得到光程差, 根据双折射光程差与应力的关系得到应力大小, 该方法简单易行, 但通过视觉的观察和比对降低了测量的精度; Senarmont 补偿法是利用不同波长的光通过主方向按一定角度放置的起偏器、样品、1/4波片和检偏器, 根据入射和出射的线偏振光偏转角度得到相位差, 进而得到应力的大小, 该方法测量精度较高, 但受器件非标准误差的影响, 且对探测器灵敏度具

有较高的要求; Tardy 法同样面临器件非标准误差和探测器灵敏度问题, Babinet 补偿器法是使用光程差可调的双折射元件对被测样品应力反向补偿, 实现对样品应力大小的推算, 该方法操作简单, 精度高, 但补偿器价格昂贵; 另外, 椭圆偏振仪^[8,9]测量的精度较高, 但价格昂贵; 应力分析仪价格低廉但精度较低.

基于激光回馈效应^[10]实现应力测量的现象是由 Tan 和 Zhang^[11]在 Nd:YAG 激光器回馈系统实验中发现的. 激光回馈应力测量系统的基本原理为: 单色线偏振光通过二维应力平面之后, 光矢量沿正交的主应力方向分解, 由于应力引起的双折射效应, 对于厚度均匀的平面, 主应力方向的光程不同, 因此两个分量不再同步. 测量系统采用压电陶瓷驱动外腔镜做往复运动, 使激光器的输出功率受到回馈光的调制而呈余弦方式波动. 应力双折射效应产生的光程差使得两个主应力方向光分量的调谐曲线产生相位差, 提取该相位差, 即可获得应力大小. 然而, 压电陶瓷在电源驱动过程中存在的运

^{*} 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61036016) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: niuyx@buaa.edu.cn

动非线性, 直接影响调谐曲线的周期性. 因此, 采用时间间隔比较法直接提取的相位差不但重复性差, 且具有较大误差.

为校正外腔镜的非线性运动对于相位差计算的影响, 采用高精度的准共路 Nd:YAG 激光回馈干涉仪 (LFI) [12,13] 测量了外腔镜的位移-时间曲线, 并将拟合出的位移-时间函数代入三镜腔等效模型. 由该模型可得: 由于外腔镜的位移函数为时间的高阶多项式函数, 调谐函数的频率同样为时间的高阶多项式函数. 对该调谐函数进行傅里叶变换, 以基频分量的相位差代替非周期调谐曲线的相位差 [14], 并计算了标准相位差在 0° — 180° 范围内该算法的误差. 该研究对于校准测量结果、提高测量精度具有重要意义.

2 实验装置及原理

本文实验装置包括两个测量系统, 如图 1 所示. T 为激光器增益管; W 为沃拉斯顿棱镜; D_1 , D_2 为光电探测器; LFI 为激光回馈干涉仪; PZT_1 , PZT_2 为压电陶瓷; DA 为数模转换器, 输出三角波电压; AD 为模数转换器; M_1 , M_2 为腔镜, M_E 为回馈镜; S 为外腔各向异性样品. 图 1 中, A 部分为激光回馈应力测量系统, B 部分为准共路 Nd:YAG 激光回馈干涉仪, 两个系统通过回馈镜 M_E 串联, M_E 上表面将系统 A 的光原路反射到激光腔内; M_E 的下表面将 LFI 的输出光通过 45° 高反射镜折返到激光腔内. PZT_2 在三角波电压的驱动下往复运动, LFI 同时记录 M_E 的位移.

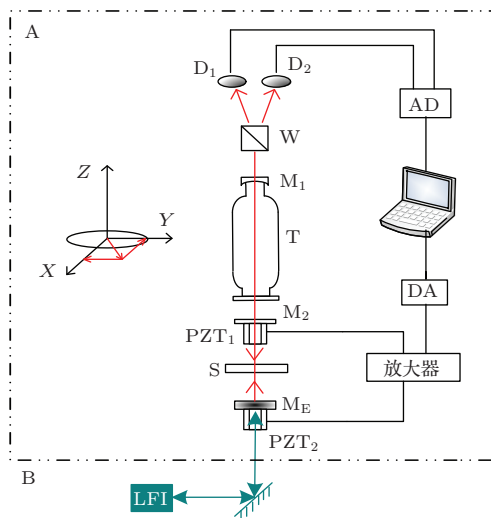


图1 (网刊彩色) 实验装置原理示意图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of experimental setup.

He-Ne 激光器具有输出模式易于控制、偏振特性稳定等特点, 因此激光回馈应力测量系统选用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为光源, 其内腔凹面反射镜 M_1 和平面输出镜 M_2 的反射率 r_1 和 r_2 分别是 99.6% 和 99%; 增益管内充有氦氖混合气体, 充气比例为 $\text{He}^3 : \text{Ne}^{20} : \text{Ne}^{22} = 9 : 0.5 : 0.5$; 平面输出镜 M_2 固定在压电陶瓷 PZT_1 上, 通过 PZT_1 的运动实现激光器输出模式的选择; M_2 和 M_E 组成测量系统的外腔, M_E 为普通玻璃, 反射率 r_e 为 4%. M_E 固定在压电陶瓷 PZT_2 上, 通过对 PZT_2 施加三角波电压, 实现外腔的腔长调谐.

如图 2 所示, 激光器的初始输出状态为线偏振光 P 、单纵模, 以激光传播方向为 Z 轴建立三维直角坐标系, σ_1 和 σ_2 为二维应力平面的主应力方向, Ax_1 与 Ax_2 分别为沃拉斯顿棱镜 W 的光轴方向, 均分别与 X 轴、 Y 轴平行. 激光器的初始偏振方向 P 与主应力方向、沃拉斯顿棱镜的两个光轴方向分别成 45° 角, 激光器的输出光矢量沿两个主应力方向分解, 并在激光器输出端由沃拉斯顿棱镜分开, 探测器 D_1 和 D_2 分别探测两个分量的大小变化. 设主应力方向的折射率分别为 n_1 , n_2 , 二维应力平面的厚度为 d , 则主应力方向的光程差为

$$d_0 = |n_1 - n_2|d. \quad (1)$$

激光器输出光经过二维应力平面后, 由回馈镜将反射光原路返回激光器内腔, 因此 Ax_1 向和 Ax_2 向的分量光程差为 $2d_0$. 激光器的输出波长为 λ , 则该光程差引起的相位差为 [11]

$$\delta = \frac{4\pi |n_1 - n_2|d}{\lambda}. \quad (2)$$

应力大小 (nm/mm) 与相位差的关系为

$$s = \frac{d_0}{d} = \frac{\delta\lambda}{4\pi d}. \quad (3)$$

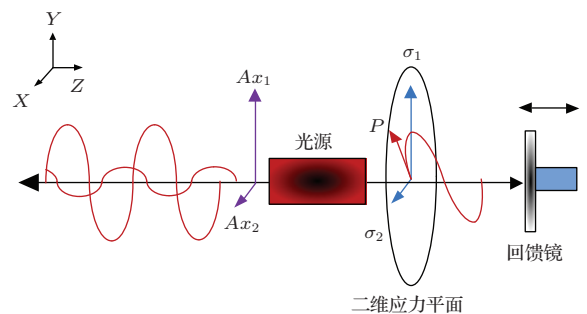


图2 (网刊彩色) 激光回馈应力测量系统光传播示意图

Fig. 2. (color online) Light propagation of laser feed-back stress measurement system.

根据三镜腔理论模型, 激光器的功率调谐曲线每波动一个周期, 对应的外腔长变化 $\lambda/2$, 设某一时刻外腔镜的位移为 x , 对应于主应力方向的初始外腔光程分别为 l_1 , $l_1 + d_0$, 主应力方向光强分量调谐曲线的初始相位分别为 α_1 , α_2 , 则输出光强表达式可写为

$$\begin{aligned} I_X &= \zeta + h_1 \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} \frac{d(l_1 + x)}{dt} t + \alpha_1 \right), \\ I_Y &= \zeta + h_2 \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} \frac{d(l_1 + d_0 + x)}{dt} t + \alpha_2 \right), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, ζ 为未引入回馈光时激光器的输出光强, 为直流量; $h \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} \frac{d(l_1 + x)}{dt} t + \alpha_1 \right)$ 为调制外腔长时, 激光回馈引入的交流分量. 由 (4) 式可得, I_X 和 I_Y 频率相等, 均为 $\varpi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dx}{dt}$, 相位差为 $\alpha_1 - \alpha_2$. 由于外腔镜的位移 x 在任意时刻均是非线性的, 导致运动速度 $\frac{dx}{dt}$ 不是一个常数, 调谐曲线的周期非常数, 采用时间间隔比较法提取相位差重复性差、精度低, 进而影响光程差及应力的计算. 因此研究外腔镜的非线性位移对相位差的影响, 对于提高测量精度具有重要实际意义.

3 实验结果与分析

3.1 非线性运动下的调谐曲线

外腔镜由压电陶瓷 PZT₂ 驱动, 实验设计如图 1 所示. LFI 对压电陶瓷 PZT₂ 位移进行测量, 得到位移随时间的变化, 结果如图 3 所示. 曲线的上升沿为驱动电压升高时压电陶瓷的位移, 下降沿为驱动电压降低时所对应的位移. 由图 3 可以看到, 压电陶瓷存在着迟滞性和非线性.

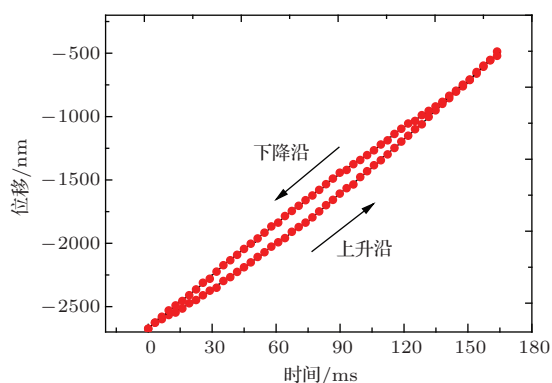


图 3 (网刊彩色) 压电陶瓷位移随时间的变化

Fig. 3. (color online) Displacement-time curve of PZT.

对电压上升时的压电陶瓷位移进行高次曲线拟合, 结果如图 4 所示. 电压上升时位移与时间的函数表达式可表示为

$$\begin{aligned} x(t) &= -31.22t^5 + 192.7t^4 - 507t^3 + 729.8t^2 \\ &+ 673.3t - 2814. \end{aligned} \quad (5)$$

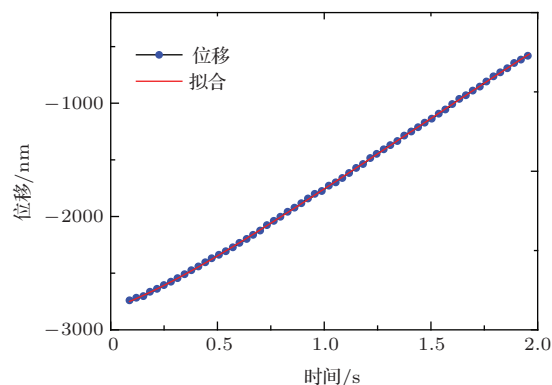


图 4 (网刊彩色) 压电陶瓷上升沿的拟合曲线

Fig. 4. (color online) Fitting curve of the increasing edge of PZT.

将 (5) 式表示的 $x(t)$ 代入 (4) 式, 因相位差提取不涉及直流量, 将其滤去后可得 He-Ne 激光器的正交方向输出光强的交流分量, 分别为

$$\begin{aligned} I_X &= h_1 \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} (-156.1t^4 + 770.8t^3 - 1521t^2 \right. \\ &\quad \left. + 1459.6t + 673.3)t + \alpha_1 \right), \\ I_Y &= h_2 \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} (-156.1t^4 + 770.8t^3 - 1521t^2 \right. \\ &\quad \left. + 1459.6t + 673.3)t + \alpha_2 \right). \end{aligned} \quad (6)$$

由 (6) 式可知, I_X , I_Y 的频率都是时间的高阶多项式函数.

采用同样的方法, 可得到下降沿的位移随时间变化的表达式:

$$\begin{aligned} x'(t) &= -8.157t^5 + 77.21t^4 - 224t^3 + 14.32t^2 \\ &+ 1518t - 2733. \end{aligned} \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (4) 式, 可得压电陶瓷在下降沿电压驱动下的光强调谐曲线. 与上升沿的情况类似, 光强调谐曲线为非准周期性余弦波形. 实验采集的曲线如图 5 所示, T_1 和 T_2 为光强曲线 I_Y 的两个相邻周期. 从图 5 可明显看出, $T_1 \neq T_2$, 而采用时间间隔比较法求取的相位差 $360^\circ \times \frac{t}{T_1} = 168.25^\circ$ 与 $360^\circ \times \frac{t}{T_2} = 199.60^\circ$ 的差别可达 31.35° .

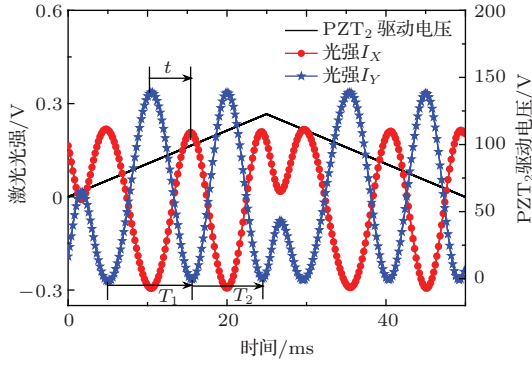


图5 (网刊彩色) 激光回馈应力测量系统实验曲线
Fig. 5. (color online) Experimental curve of laser feed-back stress measurement system.

3.2 相位差计算及误差修正

分别对压电陶瓷上升沿和下降沿中光强调谐曲线 $I_X(t)$, $I_Y(t)$ 进行傅里叶变换, 有

$$\begin{aligned}\mathfrak{F}[I_X(t)] &= a_x + c_{x1} \sin(\omega t + \theta_{x1}) \\ &\quad + c_{x2} \sin(2\omega t + \theta_{x2}) + \cdots, \\ \mathfrak{F}[I_Y(t)] &= a_y + c_{y1} \sin(\omega t + \theta_{y1}) \\ &\quad + c_{y2} \sin(2\omega t + \theta_{y2}) + \cdots.\end{aligned}\quad (8)$$

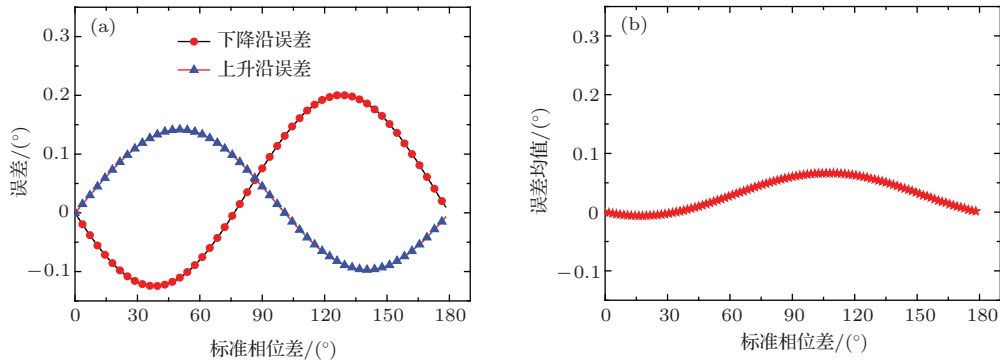


图6 (网刊彩色) (a) 误差分布曲线; (b) 平均误差曲线
Fig. 6. (color online) (a) Error distribution curve; (b) average error curve.

3.3 激光回馈引起的频率漂移对测量结果的影响

由(3)式可知, 应力计算结果除与相位差 δ 有关, 还与激光波长成正比. 根据三镜腔等效理论, 光回馈将使激光的频率发生变化. 在无光回馈条件下, 激光的角频率为

$$\omega_0 = 2m\pi \frac{c}{2L}, \quad (9)$$

其中, c 为真空光速, L 为内腔长度, m 为纵模级次. 当光回馈存在时, 激光角频率的变化为

基频分量 $c_1 \sin(\omega t + \theta)$ 在整个频谱中的能量最大, 周期性最接近原始信号 $I_{X/Y}$, 基频分量的相位差 $\Phi' = \theta_{x1} - \theta_{y1}$ 最接近(6)式中原始信号的相位差 $\Phi = \alpha_1 - \alpha_2$. 令 $I_X(t)$, $I_Y(t)$ 的初始相位差分别为 $\Phi_n = \alpha_{1n} - \alpha_{2n} = n \times 1.8^\circ$ ($n = 1, 2, 3, \dots, 100$), 分别对 100 组 $I_X(t)$, $I_Y(t)$ 进行傅里叶变换, 并提取其基频分量的相位差 $\Phi'_n = \theta_{x1n} - \theta_{y1n}$ ($n = 1, 2, 3, \dots, 100$). 该算法的误差 $\mu = \Phi'_n - \Phi$.

计算结果表明: 在 PZT₂ 的上升沿, 该算法对于相位差提取的误差范围在 -0.1° — 0.142° 之间, 下降沿的误差范围在 -0.125° — 0.2° 之间, 且上升沿和下降沿的误差走势呈现相反的趋势, 如图 6(a) 所示. 对于单位厚度的二维应力平面, 该计算方式引入的应力误差范围在 -0.11 — 0.18 nm/cm.

将压电陶瓷在上升沿和下降沿的误差求和, 取平均得到平均误差, 如图 6(b) 所示. 与图 6(a) 相比, 误差范围明显降低, 其值在 -0.00625° — 0.0665° 之间, 应力计算的误差范围降低到 -0.0055 — 0.058 nm/cm.

$$\omega - \omega_0 = \frac{c}{2L} \zeta \sin\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right), \quad (10)$$

式中, $\zeta = \frac{r_e}{r_2} t_2^2 = \frac{r_e}{r_2} (1 - r_2^2)$, 其中, t_2 为 M_2 的透射系数, r_e 为 M_E 的反射系数, r_2 为 M_2 的反射系数; l 为激光外腔长度. 由于 $r_2 \approx 1$, r_e 较小, 所以 ζ 很小. 因此, 回馈对激光频率的影响也很小, 实验结果显示约为几百 kHz. 由 $\lambda = \frac{c}{\omega_0}$, 对 ω_0 求微分可得

$$d\lambda = -\frac{c}{\omega_0^2} d\omega_0. \quad (11)$$

假设频率漂移为 900 kHz, 激光器的中心频率

ω_0 为 4.74×10^{14} Hz, 代入 (11) 式, 可得

$$\begin{aligned} d\lambda &= -\frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{(4.74 \times 10^{14} \text{ Hz})^2} \times 9 \times 10^5 \text{ Hz} \\ &= 1.2 \times 10^{-15} \text{ nm}. \end{aligned} \quad (12)$$

将 $d\lambda$ 代入 (3) 式可知, 激光回馈引起的频率 (波长) 漂移对于应力测量的影响可忽略不计.

由以上分析可知, 对激光回馈功率调谐曲线进行傅里叶变换, 以提取基频分量相位差的方式获得原曲线的相位差, 可以获得理想的精度. 通过分别求取压电陶瓷驱动电压上升沿和下降沿的相位差, 并取两者的均值, 可使应力计算的精度进一步提高到 $-0.0055-0.058$ nm/cm; 激光回馈造成的频率漂移对于应力计算的影响十分微小, 可忽略不计.

4 结 论

在激光回馈各向异性测量系统中, 外腔镜的非线性运动会导致测量结果的误差. 为获得并校准误差, 采用 Nd:YAG 激光回馈干涉仪精确测量压电陶瓷的位移, 并通过数值拟合的方式得到误差的大小. 计算结果表明, 压电陶瓷在不同运动方向引起的相位差误差呈相反的变化趋势, 将计算结果求平均, 可将误差控制在最小范围. 本研究提出一种精确获得外腔镜非线性运动引入误差的方法, 对于评估激光回馈各向异性测量系统的性能、提高测量精度具有重要意义.

参考文献

- [1] Huang W B, Deng S P, Liu Y G, Peng Z H, Yao L S, Xuan L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094208 (in Chinese) [黄文彬, 邓舒鹏, 刘永刚, 彭增辉, 姚丽双, 宣丽 2012 物理学报 **61** 094208]
- [2] Gao Y H, Xu X S 2014 *Chin. Phys. B* **23** 114205
- [3] Cao Y, Li R M, Tong Z R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084215 (in Chinese) [曹晔, 李荣敏, 童峥嵘 2013 物理学报 **62** 084215]
- [4] Wang P 2011 *M. S. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Science and Technology) (in Chinese) [王苹 2011 硕士学位论文 (南京: 南京理工大学)]
- [5] Kikuta H, Ohira Y, Iwata K 1997 *Appl. Opt.* **36** 1566
- [6] Peng H J, Wong S P, Liu X H, Lai Y W, Ho H P, Zhao S N 2003 *Proc. SPIE* **5144** 659
- [7] Wang B, Hellman W 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 4066
- [8] Liu H P, Lu F, Wang X L, Yang T L, Lü Y B, Li Y H, Liu X Z, Zhang R F, Song Q, Ma X J 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 156
- [9] Zhang J T, Li Y, Luo Z Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 186 (in Chinese) [张继涛, 李岩, 罗志勇 2010 物理学报 **59** 186]
- [10] Wu Y, Zhang P, Chen W X, Tan Y D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 124205
- [11] Tan Y D, Zhang S L 2007 *Appl. Phys. B* **89** 339
- [12] Wan X J 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [万新军 2007 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [13] Wan X J, Li D, Zhang S L 2007 *Opt. Lett.* **32** 367
- [14] Yu D R, Bao W, Xu M Q 1995 *J. Harbin Inst. Technol.* **27** 84 (in Chinese) [于达仁, 鲍文, 徐敏强 1995 哈尔滨工业大学学报 **27** 84]

Correction of error induced by nonlinear movement of feedback mirror in laser feedback stress measurement system^{*}

Niu Hai-Sha Niu Yan-Xiong[†] Liu Ning Liu Wen-Wen Wang Cai-Li

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 5 August 2014; revised manuscript received 17 October 2014)

Abstract

Stress distribution of optical materials can be measured by using the laser feedback effect. Owing to the non-linear movement of the feedback mirror, the result accuracy of the system will decrease. In this work, we measure the displacement of the feedback mirror by using a high precision quasi-common-path laser feedback interferometry. The displacement-time function is obtained by a high-end fitting method. The stress measurement error induced by the non-linear movement of the feedback mirror is calculated according to the displacement-time function and a three-mirror cavity equivalent model, and the correction for the system accuracy is achieved. The results show that the different movement direction of the feedback mirror gives rise to an opposite variation trend of error. Measurement error can be reduced by averaging the results in different directions. In the study we analyze the influence of the non-linear movement of the feedback mirror on the measurement accuracy, and a method of improving the error is proposed. This method is significant for correcting the measurement results and improving the accuracy.

Keywords: laser feedback, nonlinear correction, displacement measurement

PACS: 42.79.-e, 07.60.Ly, 06.30.Bp

DOI: 10.7498/aps.64.084208

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61036016).

[†] Corresponding author. E-mail: niuyx@buaa.edu.cn