

文章编号: 0258-7025(2006)11-1562-05

偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响

陈洪芳¹, 丁雪梅¹, 钟 志²

(哈尔滨工业大学¹ 超精密光电仪器工程研究所, ² 航天学院通信工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 为了减小激光外差干涉纳米测量的非线性误差, 必须明确偏振分光镜(PBS)分光性能非理想对非线性误差的影响机制。推导出非理想情况下偏振分光镜透射率和反射率的激光外差干涉非线性误差模型, 建立了偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差二次谐波的影响模型。仿真结果表明, 偏振分光镜的透射率和反射率非理想对非线性误差的影响为一次谐波, 且偏振分光镜分光性能越差, 其对非线性误差的影响也越大。在偏振分光镜反射率为 0.90 的情况下, 偏振分光镜透射率从 1 减小到 0.90 时, 非线性误差由 0.62 nm 增大到 1.24 nm。当存在偏振分光镜旋转角度误差时, 偏振分光镜分光性能非理想引起的非线性误差不增加二次谐波分量, 但增大了非线性误差一次谐波分量, 严重影响非线性误差的大小。当偏振分光镜旋转角度误差为 5° 时, 偏振分光镜透射率从 1 变为 0.90, 非线性误差从 0.39 nm 增大到 1.41 nm。

关键词 测量; 激光外差干涉; 非线性误差; 透射率; 反射率; 偏振分光镜; 二次谐波

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Effect of Nonlinearity by the Nonideal Splitting Performance of Polarization Beam Splitter in Laser Heterodyne Interferometry

CHEN Hong-fang¹, DING Xue-mei¹, ZHONG Zhi²

¹Institute of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China
²Department of Communication Engineering, School of Astronautics,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract To reduce the nonlinearity of nanometer measurement in laser heterodyne interferometric, the influence mechanics of nonideal splitting performance of polarization beam splitter (PBS) upon nonlinearity must be confirmed. In the paper, nonlinearity model is proposed when polarization transmissivity and reflectivity are not ideal. Model is also proposed to describe how the nonideal splitting performance of PBS influences the second-harmonic nonlinearity. The simulation results show that influence of nonideal polarization transmissivity and reflectivity on nonlinearity is the first-harmonic and the influence will be serious while the splitting performance of PBS gets worse. When reflectivity is 0.90 and transmissivity of PBS reduces from 1 to 0.90, nonlinearity increases from 0.62 nm to 1.24 nm. When the rotation angle error of PBS exists, the second-harmonic nonlinearity caused by the nonideal splitting performance of PBS will be ineffective, but the first-harmonic nonlinearity will increase and the nonlinearity is influenced greatly. It is assumed that the rotation angle error of PBS is 5° and transmissivity of PBS reduces from 1 to 0.90, nonlinearity increases from 0.39 nm to 1.41 nm.

Key words measurement; laser heterodyne interferometry; nonlinearity error; transmissivity; reflectivity; polarization beam splitter; second-harmonic

收稿日期: 2006-01-04; **收到修改稿日期:** 2006-04-27

作者简介: 陈洪芳(1980—), 女, 黑龙江省安达市人, 哈尔滨工业大学博士研究生, 主要研究方向为激光外差干涉与信号处理。E-mail: chf0302@126.com

导师简介: 丁雪梅(1959—), 女, 工学博士, 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电信息检测与处理技术、光电测量技术与仪器。E-mail: jbtan@hope.hit.edu.cn

1 引言

激光外差干涉测量系统是超精密位移检测中测量和控制的基础^[1~3]，而激光外差干涉的非线性误差严重制约了测量精度的进一步提高^[4,5]。国内外许多学者都对激光外差干涉非线性误差进行了深入的理论分析和实验研究^[1,4~15]。文献[6~10]的研究表明偏振分光镜(PBS)存在偏振泄漏是非线性误差的来源之一，但是都没有对偏振分光镜分光性能非理想产生的非线性误差进行具体的理论分析，也没有考虑其对非线性误差二次谐波的影响。文献[11~14]提出了激光外差干涉非线性误差测量和减小的方法，同样也没有考虑偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差的影响，不能有针对性地抑制和消除非线性误差。

本文通过分析偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差的影响，建立了非理想情况下偏振分光镜透射率和反射率的非线性误差模型，同时通过建立偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差二次谐波的影响模型，分析了其对非线性误差二次谐波的影响，并进行仿真实验。

2 偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差的影响

如图 1 所示，理想激光外差干涉系统中，由激光器发出的两束频率相差很小、振动方向相互正交的线偏振光能够完全分离，并在干涉仪的两个臂中传播。设偏振分光镜的透射率和反射率分别为 T_p 和 R_s ，理想情况下 $T_p = R_s = 1$ ，实际上，当光束通过偏振分光镜时，s 偏振光的反射率 R_s 和 p 偏振光的透

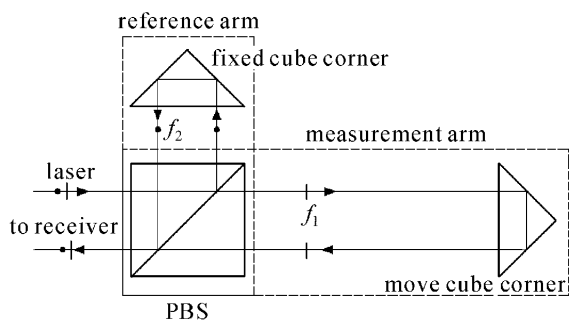


图 1 激光外差干涉测量原理图

Fig. 1 Laser heterodyne interferometric principle

射率 T_p 都不是很强，因而在反射光中存在 p 偏振光（反射率 R_p ），在透射光中存在 s 偏振光（透射率 T_s ）（见图 1），且有 $R_s + T_s = 1, T_p + R_p = 1$ 。由此而引起光束混频，产生非线性误差。

设塞曼激光器输出激光的偏振矢量为

$$\mathbf{E} = i\mathbf{E}_{01} \sin(2\pi f_1 t + \phi_{01}) + j\mathbf{E}_{02} \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02}), \quad (1)$$

其中 i, j 分别为出射平行分量 p, 垂直分量 s 的偏振方向矢量； E_{01}, E_{02} 分别为 p, s 分量的振幅； f_1, f_2 分别为 p, s 分量的频率，频差 $\Delta f = f_1 - f_2$ ； ϕ_{01}, ϕ_{02} 分别为 p, s 分量的初始相位。

\mathbf{E} 经过偏振分光镜分光后，s 分量反射形成参考光，p 分量透射形成测量光。由于偏振分光镜非理想存在泄漏光，则此时测量光和参考光的偏振矢量 \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 分别为

$$\mathbf{E}_1 = i[T_p E_{01} \sin(2\pi f_1 t + \phi_{01}) + (1 - R_s) E_{02} \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02})], \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_2 = j[R_s E_{02} \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02}) + (1 - T_p) E_{01} \sin(2\pi f_1 t + \phi_{01})]. \quad (3)$$

当光束经参考棱镜和测量棱镜反射后再次经过偏振分光镜时同样存在光泄漏，则偏振分光镜最终出射的测量光和参考光的偏振矢量 \mathbf{E}'_1 和 \mathbf{E}'_2 分别为

$$\mathbf{E}'_1 = i\{T_p^2 E_{01} \sin[2\pi(f_1 + 2f_D)t + \phi_{01} + \phi_1] + (1 - R_s)^2 E_{02} \sin[2\pi(f_2 + 2f_D)t + \phi_{02} + \phi_1]\}, \quad (4)$$

$$\mathbf{E}'_2 = j\{R_s^2 E_{02} \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02} + \phi_2) + (1 - T_p)^2 E_{01} \sin(2\pi f_1 t + \phi_{01} + \phi_2)\}, \quad (5)$$

其中， ϕ_1 为测量光路相位增量， ϕ_2 为参考光路相位增量， $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 包含了被测位移信息。 f_D 为测量棱镜运动过程中引起的多普勒频移。

\mathbf{E}'_1 和 \mathbf{E}'_2 经检偏器后由光电探测器接收形成测量信号 I_m 可表示为

$$I_m \sim \frac{1}{2} |\mathbf{E}'_1 + \mathbf{E}'_2|^2 \sim I_0 A^* \cos[2\pi(\Delta f + 2f_D)t + \phi_{01} - \phi_{02} + \Delta\phi + \Delta\phi_{\text{nonlin}}], \quad (6)$$

式中 $I_0 \propto \frac{1}{2} E_{01} E_{02}$ ， A^* 为待定系数， $\Delta\phi_{\text{nonlin}}$ 为由偏振分光镜分光性能非理想引起的激光外差干涉非线性误差。根据式(4)和(5)可推导出 $\Delta\phi_{\text{nonlin}}$ 和 A^* 的表达式为

$$\Delta\phi_{\text{nonlin}} = -\arctan \frac{[T_p^2(1 - R_s)^2 + R_s^2(1 - T_p)^2] \sin(\Delta\phi) + (1 - R_s)^2(1 - T_p)^2 \sin(2\Delta\phi)}{[T_p^2(1 - R_s)^2 + R_s^2(1 - T_p)^2] \cos(\Delta\phi) + (1 - R_s)^2(1 - T_p)^2 \cos(2\Delta\phi) + T_p^2 R_s^2}, \quad (7)$$

$$A^* = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + 2a(b + c) \cos(\Delta\phi) + 2bc \cos(2\Delta\phi)}, \quad (8)$$

式(8)中 $a = T_p^2(1 - R_s)^2 + R_s^2(1 - T_p)^2, b = (1 - R_s)^2(1 - T_p)^2, c = T_p^2R_s^2$ 。

为了简化分析,令 $R_s = 1$,则由偏振分光镜透射率非理想引起的非线性误差为

$$\Delta\phi'_{\text{nonlin}} = -\arctan \frac{(1 - T_p)^2 \sin(\Delta\phi)}{(1 - T_p)^2 \cos(\Delta\phi) + T_p^2} \quad (9)$$

图 2 即为根据式(9)在偏振分光镜透射率不同情况下的非线性误差仿真曲线。可以看出,由于非理想透射率引起的非线性误差为半波长的一次谐波,随着透射率的减弱,非线性误差增大,但增加幅度很小。当 T_p 从 0.99 减小到 0.90 时,非线性误差的大小从 0.01 nm 增加到 0.62 nm。

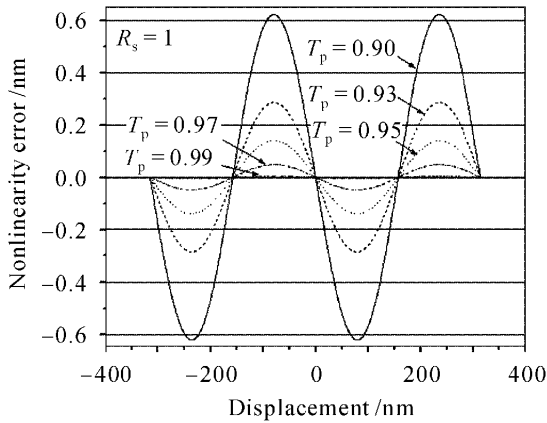


图 2 偏振分光镜反射率理想情况下透射率不同引起的非线性误差仿真图

Fig. 2 Nonlinearity resulting from different transmissivity when reflectivity of PBS is ideal

当偏振分光镜的偏振光透射率和反射率都为非理想的情况下,根据式(7)对非线性误差进行仿真,结果如图 3 所示。从图中可以看出,在偏振分光镜透射率和反射率都很小的情况下,其对非线性误差的影响很大。在反射率为 0.90 的情况下,透射率从 1 减小到 0.90,非线性误差由 0.62 nm 增加到 1.24 nm。

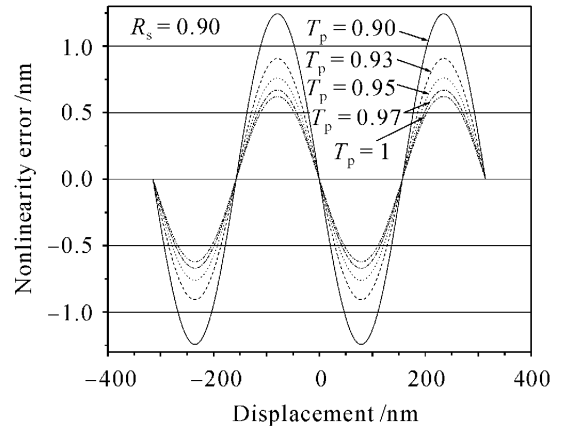


图 3 偏振分光镜反射率为 0.90 的情况下透射率不同引起的非线性误差仿真图

Fig. 3 Nonlinearity resulting from different transmissivity when reflectivity of PBS is 0.90

因此在激光外差干涉纳米测量中,当偏振分光镜偏振光的透射率或反射率其中有一项较为理想时,偏振分光镜分光性能非理想引起的非线性误差很小,可以不考虑。但是如果偏振分光镜偏振光的透射率和反射率都较弱时,其对非线性误差的影响不能忽略。在测量时应选用透射率和反射率都较高的偏振分光镜来减小其对非线性误差的影响。

3 偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差二次谐波的影响

在激光外差干涉测量中,如果偏振分光镜存在放置误差,那么激光器发出的两束振动方向相互正交的线偏振光相对偏振分光镜的分光轴会存在旋转角度误差,由此产生二次谐波非线性误差^[9,14]。假设偏振分光镜的旋转角度误差为 α ,同时为了简化计算令偏振分光镜的反射率为 1,透射率为 T_p ,则激光器发出的理想正交线偏振光通过该偏振分光镜后,最终出射的测量光和参考光的偏振矢量 E'_1 和 E'_2 分别为

$$E'_1 = i\{T_p^2\{\cos\alpha\sin[2\pi(f_1 + 2f_D)t + \phi_1] + \sin\alpha\sin[2\pi(f_2 + 2f_D)t + \phi_1]\}\}, \quad (10)$$

$$E'_2 = j\{\cos\alpha\sin(2\pi f_2 t + \phi_2) - \sin\alpha\sin(2\pi f_1 t + \phi_2) + (1 - T_p)^2[\cos\alpha\sin(2\pi f_1 t + \phi_2) + \sin\alpha\sin(2\pi f_2 t + \phi_2)]\}, \quad (11)$$

E'_1 和 E'_2 经检偏器后由光电探测器接收形成的测量信号 I'_m 可表示为

$$I'_m \sim I_0 B^* \cos[2\pi(\Delta f + 2f_D)t + \phi_{01} - \phi_{02} + \Delta\phi + \Delta\phi'_{\text{nonlin}}], \quad (12)$$

其中
$$\Delta\phi'_{\text{nonlin}} = -\arctan \frac{A\sin(\Delta\phi) + B\sin(2\Delta\phi)}{C + A\cos(\Delta\phi) + B\cos(2\Delta\phi)}, \quad (13)$$

$$B^* = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + 2A(B + C)\cos(\Delta\phi) + 2BC\cos(2\Delta\phi)}, \quad (14)$$

$$A = T_p^4 \sin \alpha \cos \alpha - \sin \alpha \cos \alpha + (1 - T_p)^2 \cos^2 \alpha - (1 - T_p)^2 \sin^2 \alpha + (1 - T_p)^4 \sin \alpha \cos \alpha,$$

$$B = -T_p^2 \sin^2 \alpha + T_p^2 (1 - T_p)^2 \sin \alpha \cos \alpha,$$

$$C = T_p^2 \cos^2 \alpha + T_p^2 (1 - T_p)^2 \sin \alpha \cos \alpha.$$

图4是根据式(13)在偏振分光镜透射率不同的情况下的非线性误差仿真曲线,其中偏振分光镜的旋转角度误差 $\alpha = 5^\circ$ 。

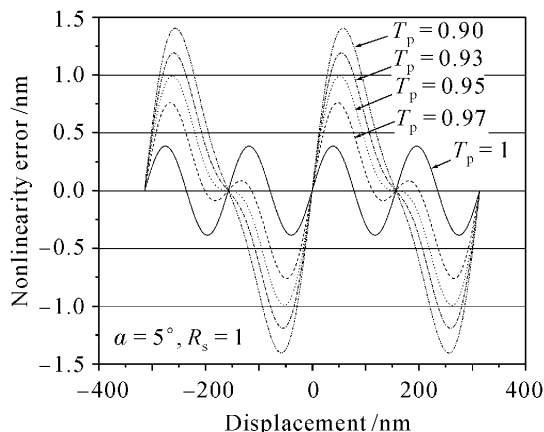


图4 偏振分光镜旋转角度误差为 5° ,反射率为0.90的情况下透射率不同引起的非线性误差仿真图

Fig.4 Nonlinearity resulting from different transmissivity when PBS rotation error is 5° and reflectivity of PBS is 0.90

从图4可以看出,随着激光外差干涉偏振分光镜透射率的不断减弱,其引起的非线性误差也越大,而且严重影响偏振分光镜旋转角度误差引起的二次谐波非线性误差。当 α 为 5° 而偏振分光镜透射率由1减小到0.90时,非线性误差由原来的0.39 nm增加到1.41 nm,且改变了非线性误差与位移之间的相

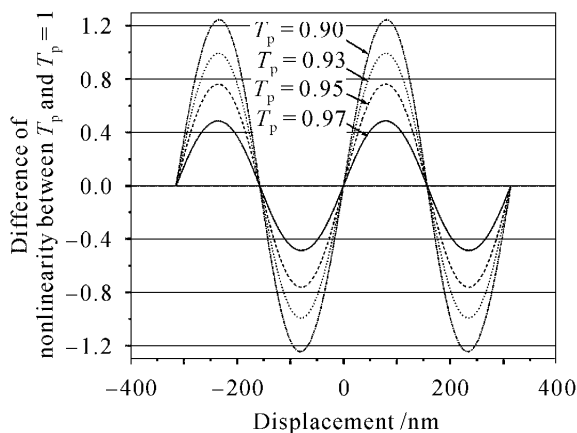


图5 相同偏振分光镜旋转角度误差($\alpha = 5^\circ$)情况下不同透过率引起的非线性误差差值

Fig.5 Difference of nonlinearity resulting from different transmissivity with a constant rotation angle ($\alpha = 5^\circ$) of PBS

位关系。

为了进一步分析偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差二次谐波的影响,在相同偏振分光镜旋转角度误差($\alpha = 5^\circ$)情况下,将透射率非理想与透射率为1的非线性误差进行相减,得到图5所示的非线性误差差值曲线。从图5可知,偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差的二次谐波没有影响,但增大了非线性误差一次谐波分量,同时说明理想正交线偏振光通过分光性能非理想且存在旋转角度误差的偏振分光镜后,引起的非线性误差为一次谐波和二次谐波的简单叠加。

4 结 论

分析了偏振分光镜分光性能非理想对激光外差干涉非线性误差的影响。偏振分光镜分光性能非理想引起的非线性误差为一次谐波,当偏振分光镜的透射率或反射率其中有一项较为理想时,偏振分光镜分光性能非理想引起的非线性误差很小;但是如果偏振分光镜透射率和反射率都较弱时,其对非线性误差的影响很大。因此测量时应选用透射率和反射率都较高的偏振分光镜来减小其对非线性误差的影响。当存在偏振分光镜旋转角度误差时,偏振分光镜分光性能非理想使激光外差干涉的非线性误差为一次谐波与二次谐波的叠加,其对非线性误差二次谐波分量没有影响,且不改变非线性误差一次谐波的周期,但增大了非线性误差一次谐波分量,并严重影响非线性误差的大小。为了减小偏振分光镜分光性能非理想对非线性误差的影响,测量时应选用透射率和反射率都较高的偏振分光镜,从而达到减小激光外差干涉非线性误差的目的。

参 考 文 献

- 1 Li Yongqian, Zhu Mingquan. Optical interferometry technology and its development in nanometric accuracy measurement [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2002, **38**(2): 32~36
黎永前,朱名铨. 光干涉技术在纳米精度测量中的应用及发展 [J]. *航空精密制造技术*, 2002, **38**(2):32~36
- 2 Zhao Hongzhi, Zhao Yang, Wang Jia *et al.*. Signal processing scheme for optical heterodyne interferometer with wide range [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, **4**(4):130~133
赵洪志,赵洋,王佳等. 一种宽量程光外差干涉信号的处理方法 [J]. *光学精密工程*, 1996, **4**(4):130~133
- 3 Yu Yingjie, Li Pengsheng, Qiang Xifu. Research on focusing and determining center for heterodyne interference system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, **6**(4):111~117
于瀛洁,李鹏生,强锡富. 外差干涉测量系统调焦的定心方法的研究 [J]. *光学精密工程*, 1998, **6**(4):111~117

- 4 Dai Gaoliang, Yin Chunyong, Xie Guangping. Study on drift of nonlinearity in nanometer precision heterodyne interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(12):1697~1702
戴高良,殷纯永,谢广平. 纳米精度外差干涉仪非线性漂移的研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(12):1697~1702
- 5 Dai Gaoliang, Chao Zhixia, Yin Chunyong *et al.*. Determining the residual nonlinear of a dual-frequency interferometer for nanometrology [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(11):987~992
戴高良,晁志霞,殷纯永等. 纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的确定方法[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(11):987~992
- 6 Wenmei Hou, Günter Wilkening. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers [J]. *Prec. Eng.*, 1992, **14**(2):91~98
- 7 J. M. De Freitas. Phase nonlinearity extrema in Zeeman heterodyne interferometry [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(2):572~575
- 8 J. M. De Freitas, M. A. Player. Polarization effects in heterodyne interferometry [J]. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**(9):1875~1899
- 9 S. J. A. G. Cosijns, H. Haitjema, P. H. J. Schellekens. Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry [J]. *Prec. Eng.*, 2002, **26**:448~455
- 10 Qiu Zongming, Liu Jun, Guo Yanzhen. Nonlinear analysis and improvement of Zeeman laser heterodyne interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(11):991~995
邱宗明,刘 君,郭彦珍. 塞曼激光外差干涉仪的非线性分析及校正[J]. *光子学报*, 1998, **27**(11):991~995
- 11 V. G. Badami, S. R. Patterson. A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne interferometry [J]. *Prec. Eng.*, 2000, **24**:41~49
- 12 Attilio Sacconi, Gian Bartolo Picotto, Walter Pasin. The IMGCC calibration setup for micro-displacement actuators [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, **48**(2):483~487
- 13 Zhong Zhi, Tan Jiubin, Chen Hongfang *et al.*. A novel method to measure the nonlinearity in laser heterodyne interferometer [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(7):817~820
钟 志,谭久彬,陈洪芳等. 一种激光外差干涉非线性误差新颖测量方法[J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(7):817~820
- 14 J. M. De Freitas, M. A. Player. Importance of rotational beam alignment in the generation of second harmonic errors in laser heterodyne interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1993, **4**:1173~1176
- 15 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Effect of nonlinearity by the rotation of the polarizer in laser heterodyne interferometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1281~1285
陈洪芳,丁雪梅,钟 志等. 激光外差干涉检偏器旋转误差对非线性误差的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1281~1285