

非偏振分光镜对外差干涉仪非线性误差的影响

邓元龙^{1,2} 李学金² 耿优福² 洪学明²

(¹ 深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060)
(² 深圳市传感器技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 除了激光源、偏振分光镜(PBS)和波片等偏振器件之外,非偏振分光镜(NPBS)也是外差干涉仪中重要的非线性误差源。研究了多层介质膜 NPBS 的退偏效应和方位角对非线性误差的影响。采用 p、s 分量透射比、反射比、反射相移和透射相移共同表征 NPBS 的退偏效应,并逐项分析了其非线性误差模型。如果入射光束为理想线偏振光,则只有 NPBS 的反射相移和透射相移影响测量精度。如果入射光束存在偏振椭圆化和非正交,则 NPBS 的方位角、透射比和反射比、相移等参数的变化都会引入非线性误差,误差曲线的斜率受椭圆率和非正交角的影响。因此选用不同的激光源,同一个 NPBS 产生的非线性误差大小不同,一般可达几个纳米量级。为了实现纳米/亚纳米级精度的外差干涉测量,选择性能稳定的 NPBS,特别是 NPBS 退偏效应与激光源输出偏振态之间的匹配非常重要。

关键词 测量;外差干涉仪;非线性误差;非偏振分光镜;退偏效应;方位角误差

中图分类号 TN247; TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1112008

Influence of Nonpolarizing Beam Splitters on Nonlinear Error in Heterodyne Interferometers

Deng Yuanlong^{1,2} Li Xuejin² Geng Youfu² Hong Xueming²

(¹ College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)
(² Shenzhen Key Laboratory of Sensor Technology, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract In a laser heterodyne interferometer, nonpolarizing beam splitters (NPBS) are also the important nonlinear error sources besides laser sources, polarizing beam splitters (PBS), wave plates and other polarizing components. The influence of depolarization effect and misorientation of a multi-layer dielectric NPBS on the nonlinear error is investigated. The depolarization effect is characterized as the reflectance, transmittance, reflection-induced-retardance (RIR) and transmission-induced-retardance (TIR) between the p- and s- components. The producing mechanism of the nonlinear error is accordingly analyzed. Only the RIR and TIR have contribution to the nonlinear error while the incident light is in ideal polarization state. Otherwise the variation of the misorientation and the depolarization effect will introduce nonlinear error, and the error slopes are affected by the elliptical polarization and non-orthogonality. Therefore the error introduced by the same NPBS varies with laser sources used in interferometers. Generally it will be up to several nanometers. A NPBS with steady performance should be selected to seek nanometer even sub-nanometer accuracy. The parameters match between the depolarization effect of NPBS and the polarization state of laser source should also be attached more importantly.

Key words measurement; heterodyne interferometer; nonlinear error; nonpolarizing beam splitter (NPBS); depolarization effect; misorientation

OCIS codes 120.3180; 260.5430; 120.5050

1 引言

激光外差干涉仪采用简单的相位比较即可达到很高的测量分辨率,而且测量速度快、抗干扰能力

和溯源性强,应用于纳米精度位移测量有独特的优势。然而,干涉仪固有的非线性误差限制了测量精度的进一步提高,是激光外差干涉仪获得实际应用

收稿日期: 2012-05-07; **收到修改稿日期**: 2012-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(60978041)和深圳市科技配套项目(ZYC201006090091A)资助课题。

作者简介: 邓元龙(1971—),男,博士,教授,主要从事测量技术与仪器和传感器等方面的研究。

E-mail: dengyl@szu.edu.cn(中国光学学会会员号: s040m469s)

的主要障碍^[1]。因此,外差干涉测量系统中的误差分析一直是国内外的研究热点^[1~11]。很多研究人员对激光光源^[12]、偏振分光镜(PBS)^[4,9,12]、波片^[11]、镀膜实体角锥棱镜^[5]和金属反射镜^[10]等误差源开展了卓有成效的研究工作,取得了许多有意义的研究成果,提出了多种非线性误差测量与补偿方法^[2~8]。从一开始发现激光干涉测量非线性误差以来,PBS就是研究的重点,而对于非偏振分光镜(NPBS)引入的非线性误差,国内外一直缺乏相应的研究。候文玫等^[4]实验测量了NPBS引入的非线性位移测量误差,并发现采用不同激光光源,位移误差在1.6~2.2 nm之间,但是并没有给出相应的理论分析以及NPBS对非线性误差的影响机理。

本文针对迈克耳孙式激光外差干涉位移测量系统,研究了多层介质膜NPBS的退偏效应、方位角对测量误差的影响,并结合激光光源输出偏振态的畸变,给出了NPBS方位角、透射比和反射比、反射相移和透射相移等参数的非线性误差模型。研究结果对设计和选择高质量的NPBS,特别是NPBS与激光光源的匹配,实现纳米/亚纳米级精度的外差干涉测量有指导意义。

2 含有非理想 NPBS 的外差干涉测量系统

迈克耳孙式激光外差干涉仪一般结构如图1所示。由Zeeman激光(或者单频激光和调制器)产生的双频线偏振光入射NPBS,分为测量光束和参考光束。在参考光路中,反射棱镜M_r静止不动,而测量棱镜M_m的位移对测量光束的相位进行调制。经过45°放置的检偏器后,光电探测器接收测量信号和参考信号。通过比较这两路信号的相位差,计算出测量棱镜的位移。

如果入射光束为理想线偏振光,可以表示为

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \exp[i(\omega_2 t + \alpha_2)] + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \exp[i(\omega_1 t + \alpha_1)]. \quad (1)$$

采用琼斯矩阵法,系统的琼斯响应可表示为

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{A}(\pi/4) \cdot \mathbf{B}_R \cdot \mathbf{E},$$

$$\mathbf{E}_m = \mathbf{A}(\pi/4) \cdot$$

$$[\mathbf{P}_T \cdot \mathbf{Q}(3\pi/4) \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{Q}(\pi/4) \cdot \mathbf{P}_R + \mathbf{P}_R \cdot \mathbf{Q}(3\pi/4) \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{Q}(\pi/4) \cdot \mathbf{P}_T] \cdot \mathbf{E}, \quad (2)$$

忽略不影响结果的常系数,PBS、反射棱镜M、1/4

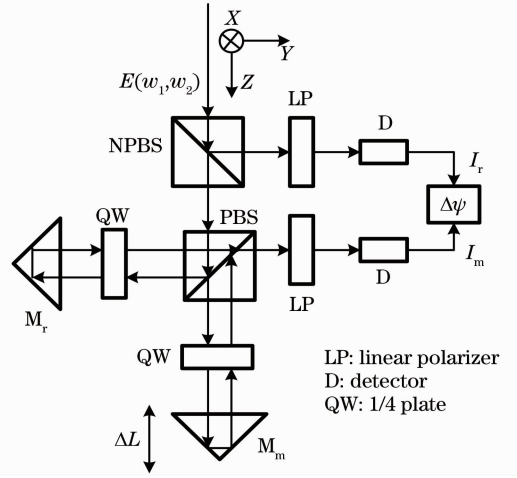


图1 激光外差干涉仪原理

Fig.1 Schematic of the laser heterodyne interferometer

波片QW、检偏器LP的琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{P}_R = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Q}(\pi/4) = \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q}(3\pi/4) = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A}(\pi/4) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

考虑到多层介质膜的退偏效应,NPBS的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{B}_T = \begin{pmatrix} T_s \exp(i\tau_s) & 0 \\ 0 & T_p \exp(i\tau_p) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_R = \begin{pmatrix} R_s \exp(i\epsilon_s) & 0 \\ 0 & R_p \exp(i\epsilon_p) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中Texp(iτ)和Rexp(iε)分别代表NPBS的透射率和反射率,下标p,s表示平行分量和垂直分量。

(4)式可以归一化为

$$\mathbf{B}_T = \begin{pmatrix} \eta \exp(i\tau) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_R = \begin{pmatrix} \kappa \exp(i\epsilon) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

定义η,κ分别为p,s分量的透射比和反射比;ε,τ分别为NPBS的反射相移和透射相移,

$$\eta = T_s/T_p, \quad \tau = \tau_s - \tau_p, \quad \kappa = R_s/R_p, \quad \epsilon = \epsilon_s - \epsilon_p. \quad (6)$$

如果NPBS的p,s轴方向与图1中的Y,X轴不完全重合,即围绕Z轴存在一个旋转角,将其定义为方位角误差θ,则NPBS的琼斯矩阵转换为

$$\mathbf{B}_T = \begin{pmatrix} \eta \exp(i\tau) \cos \theta & -\sin \theta \\ \eta \exp(i\tau) \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_R = \begin{pmatrix} \kappa \exp(i\epsilon) \cos \theta & -\sin \theta \\ \kappa \exp(i\epsilon) \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (7)$$

将(1)、(3)~(7)式代入(2)式,忽略不影响结果的常数项,可得测量信号和参考信号的光强

$$\begin{aligned} I_r &\propto A_r \kappa \exp(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \epsilon) \\ I_m &\propto A_m \eta \exp(\Delta\omega t + \Delta\alpha' + \tau), \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\Delta\alpha' - \Delta\alpha$ 包含了被测位移量信息。

根据(8)式可知,如果其他光学元器件都处于理想状态,NPBS的方位角误差 θ 以及 p、s 分量的透射比 η 和反射比 κ 对测量都没有影响;NPBS 的反射相移 ϵ 和透射相移 τ 对测量的影响,可以通过标定消除。但是, ϵ 和 τ 的不同步漂移则直接影响测量精度,且无法通过标定来消除。已有多篇文献指出,NPBS 的反射相移 ϵ 、透射相移 τ 、透射比 η 和反射比 κ 都随温度和入射角的变化而变化,入射角变化 1° ,NPBS 的相移约变化 5° , η 和 κ 约变化 5% ,且变化规律不同步^[13,14];而温度引起的相移变化率约为 $0.12^\circ/\text{C}$ ^[15,16]。上述反射相移和透射相移的变化差异,会直接导致相位差误差。

有文献理论研究并实验证明,NPBS 的分光比

受入射光束偏振态的影响^[17,18]。因此,需要进一步研究图 1 中入射线偏振光存在椭圆化和非正交情况下,NPBS 对测量精度的影响。

3 光束偏振态畸变引入的误差

如图 2 所示,如果入射的双频线偏振光存在椭圆化与非正交情况,则(1)式变换为

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 \\ \gamma_1 \exp(-i\pi/2) \end{pmatrix} \exp[i(\omega_1 t + \alpha_1)] + \\ &\begin{pmatrix} \sin \beta - i\gamma_2 \cos \beta \\ \cos \beta - i\gamma_2 \sin \beta \end{pmatrix} \exp[i(\omega_2 t + \alpha_2)], \end{aligned} \quad (9)$$

式中 γ_1 和 γ_2 分别为不同频率分量的椭圆率, β 为这两个分量之间的非正交角。即使质量很好的 He-Ne 激光管, β 也可能达到 3° , 而 γ 可达 0.05 左右^[19]。

将(9)式代替(1)式,同理可得测量光和参考光的场强为

$$\begin{aligned} E_r &\propto A_1 \exp(i\phi_1) \exp[i(\omega_1 t + \alpha_1)] + A_2 \exp(i\phi_2) \exp[i(\omega_2 t + \alpha_2)], \\ E_m &\propto A_3 \exp(i\phi_3) \exp[i(\omega_1 t + \alpha_1)] + A_4 \exp(i\phi_4) \exp[i(\omega_2 t + \alpha_2)], \end{aligned} \quad (10)$$

式中

$$\begin{aligned} A_1 \exp(i\phi_1) &= \kappa \exp(i\epsilon) (\cos \theta + \sin \theta) + i\gamma_1 (\sin \theta - \cos \theta), \\ A_2 \exp(i\phi_2) &= \kappa \exp(i\epsilon) [\sin(\theta + \beta) - i\gamma_2 \cos(\theta + \beta)] + (\cos \beta + i\gamma_2 \sin \beta) (\cos \theta - \sin \theta), \\ A_3 \exp(i\phi_3) &= \eta \exp(i\tau) (\cos \theta + \sin \theta) + i\gamma_1 (\sin \theta - \cos \theta), \\ A_4 \exp(i\phi_4) &= \eta \exp(i\tau) [\sin(\theta + \beta) - i\gamma_2 \cos(\theta + \beta)] + (\cos \beta + i\gamma_2 \sin \beta) (\cos \theta - \sin \theta). \end{aligned} \quad (11)$$

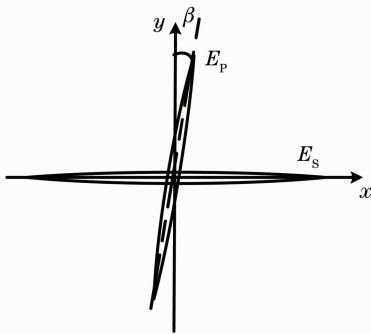


图 2 光束偏振椭圆化与非正交

Fig. 2 Schematic of elliptical polarization and non-orthogonality

与(8)式对比,测量信号与参考信号可以修改为

$$\begin{aligned} I_r &\propto A_1 A_2 \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \phi_1 - \phi_2), \\ I_m &\propto A_3 A_4 \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha' + \phi_3 - \phi_4), \end{aligned} \quad (12)$$

根据(12)式,可得相位差误差

$$\delta\Delta = (\phi_3 - \phi_4) - (\phi_1 - \phi_2) - \phi_c, \quad (13)$$

式中 ϕ_c 为测量开始时标定的相位差。

4 误差分析与讨论

NPBS 的玻璃基片折射率为 1.5416,交错镀四层折射率分别为 2.00 和 1.45 的分光介质膜系,每层厚度均为 1.5λ ,则 NPBS 的光学参数如表 1 所示。

表 1 NPBS 的光学参数

Table 1 Optical parameters of the NPBS

Polarization components	R	T	τ / rad	ϵ / rad
s	0.9341	0.3571	-0.8596	2.2255
p	0.2064	0.9785	-1.7034	1.4758

$\eta=0.3649$, $\kappa=4.5257$, $\tau=0.8438$, $\epsilon=0.7497$ 。

将表 1 数据代入(11)式和(13)式,图 3 描述了在不同椭圆率 γ 、不同非正交角 β 情况下,相位差误差随 NPBS 方位角 θ 的变化规律。

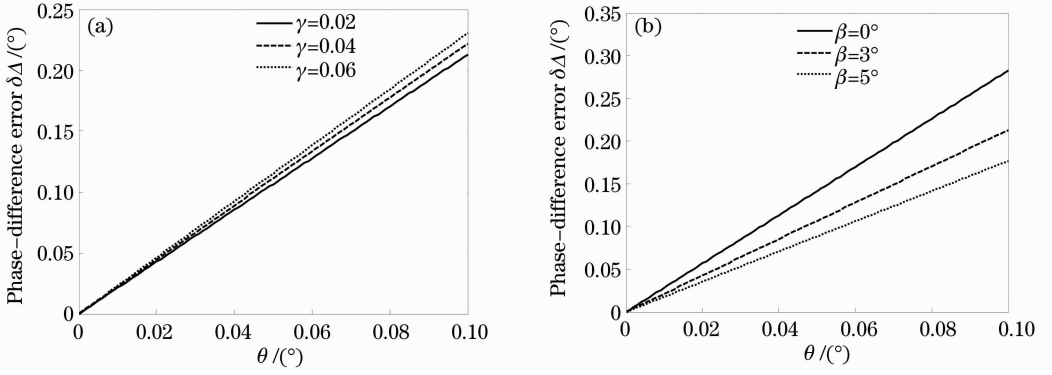


图 3 方位角 θ 对相位差误差的影响。(a)非正交角 $\beta=3^\circ$ ；(b)椭圆率 $\gamma=0.02$

Fig. 3 Phase-difference error versus misorientation angle θ . (a) $\beta=3^\circ$; (b) $\gamma=0.02$

由图 3 可知，相位差误差与方位角 θ 近似成线性关系，其斜率受激光器输出光束的偏振态畸变参数(椭圆率 γ 和非正交角 β)影响，相对而言，非正交角 β 影响更大。当 $\theta=0.1^\circ$ 时，相位差误差 $\delta\Delta \approx 0.2^\circ$ ，相当于引入 0.35 nm 的位移测量误差。因此，对于纳米精度激光外差干涉测量而言，NPBS 的对准精度很重要。

设方位角 $\theta=0^\circ$ ，NPBS 的 p、s 分量透射比 η 变

化 $\pm 2\%$ ，图 4 描述了相位差误差的变化规律。与上述结论类似，测量误差受光束偏振态畸变和 NPBS 参数波动的共同影响，椭圆率 γ 对 η 引入的误差曲线的斜率影响很大。当 $\gamma \leq 0.02$ 时， η 波动引入的测量误差很小，可以忽略不计。当 $\gamma=0.04$ ， η 变化 2% 时，相位差误差 $\delta\Delta \approx 0.1^\circ$ ，相当于引入约 0.18 nm 的位移测量误差。进一步计算表明，反射比 κ 对测量误差的影响规律与 η 基本一致。

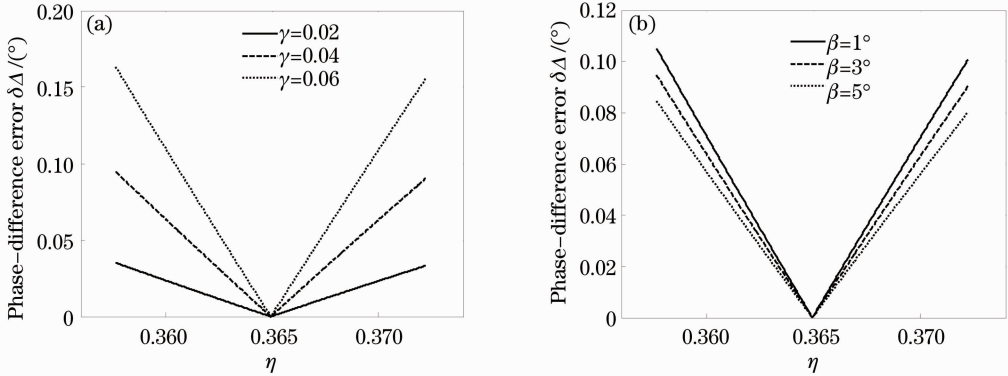


图 4 η 对相位差误差的影响($\theta=0^\circ$)。(a)非正交角 $\beta=3^\circ$ ；(b)椭圆率 $\gamma=0.04$

Fig. 4 Phase-difference error versus η ($\theta=0^\circ$). (a) $\beta=3^\circ$; (b) $\gamma=0.04$

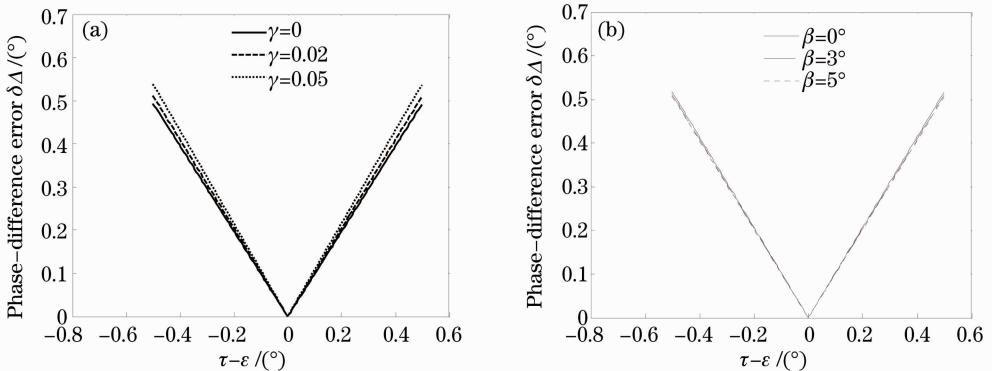


图 5 $\tau - \epsilon$ 对相位差误差的影响($\theta=0^\circ$)。(a)非正交角 $\beta=3^\circ$ ；(b)椭圆率 $\gamma=0.02$

Fig. 5 Phase-difference error versus $\tau - \epsilon$. (a) $\beta=3^\circ$; (b) $\gamma=0.02$

考虑到 NPBS 的反射相移 ϵ 和透射相移 τ 受温度和入射角等因素的影响, 会产生一定的漂移, 且变化不同步^[13~16]。因此图 5 研究了相位差误差随 $\tau - \epsilon$ 的变化规律。 τ 和 ϵ 的变化差异会直接引入 1:1 的相位差误差, 对外差干涉测量精度影响非常大, 且几乎不受光源偏振态畸变的影响。图 5 所揭示的 τ, ϵ 对测量误差的影响与(8)式相一致, 根据文献[15, 16], 如果环境温度变化 2 °C, 则引入 0.24° 的相移漂移, 相当于产生 0.4 nm 的位移测量误差。

综合上述几类误差项分析结果, NPBS 引入的总误差可合成为 1~2 nm, 与文献[4]实测结果基本一致。

5 结 论

针对迈克耳孙式激光外差干涉仪, 研究了多层介质膜 NPBS 的退偏效应和方位角引入的非线性误差。采用 p、s 分量透射比 η 、反射比 κ 、反射相移 ϵ 、透射相移 τ 共同表征 NPBS 的退偏效应, 建立了相应的误差模型。研究表明, 如果入射光束为理想线偏振光, 则只有 NPBS 的反射相移和透射相移的不同步漂移会影响测量精度。如果入射光束存在偏振态畸变(用椭圆率 γ 和非正交角 β 描述), 则 NPBS 的方位角 θ 、透射比和反射比、相移等参数的变化都影响测量精度, 误差曲线的斜率受椭圆率和非正交角调制, 其中方位角和相移对测量精度影响最大。

对于理想 NPBS ($\eta = \kappa, \epsilon = \tau$), 方位角 θ 对测量没有影响; 否则由(11)~(13)式可知, 透射比 η 、反射比 κ 、反射相移 ϵ 、透射相移 τ 、椭圆率 γ 和非正交角 β 的相对大小, 综合决定误差幅度, 规律比较复杂。也就是说, 对于同一个非理想的 NPBS, 不同激光源输出光束的椭圆率和非正交角不同, 非线性误差也有较大差异。这个结论可以用于解释文献[4]中采用不同激光器, 误差数据差异较大的原因。为了实现纳米/亚纳米级精度的外差干涉位移测量技术, 选择性能稳定的 NPBS, 特别是 NPBS 与激光源之间的匹配非常重要。

参 考 文 献

- 1 Wenmei Hou, Gunter Wilkening. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers[J]. *Precision Engineering*, 1992, **14**(1): 91~98
- 2 Chien-ming Wu, Ching-shen Su. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 1996, **7**(1): 62~68
- 3 Chunyong Yin, Gaoliang Dai, Zhixia Chao *et al.*. Determining

- the residual nonlinearity of a high-precision heterodyne interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(8): 1361~1365
- 4 Hou Wenmei, Zhang Yunbo, Xu Qixin *et al.*. Effect of beam splitter on nonlinearity in heterodyne interferometers[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2008, **44**(9): 163~168
- 侯文玫, 张运波, 许琦欣等. 分光镜对外差激光干涉仪非线性误差的影响[J]. *机械工程学报*, 2008, **44**(9): 163~168
- 5 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi *et al.*. Method to reduce first harmonic nonlinearity in laser heterodyne interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1027~1030
- 陈洪芳, 丁雪梅, 钟志等. 减小外差干涉一次谐波非线性误差的方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1027~1030
- 6 Li Liyan, Wu Bing, Yuan Yonggui *et al.*. Research on nonlinear error compensation method for single-frequency laser interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0726003
- 李立艳, 吴冰, 苑勇贵等. 单频激光干涉仪非线性误差补偿方法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0726003
- 7 Hou Wenmei, Wang Jun. Subdivision and elimination of nonlinearity in heterodyne interferometers[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2007, **28**(3): 210~215
- 侯文玫, 王俊. 外差激光干涉仪非线性误差的细分和消除[J]. *计量学报*, 2007, **28**(3): 210~215
- 8 Liu Binbin, Yuan Yonggui, Wang Xinxing *et al.*. Real-time nonlinearity error correction method of polarizing laser interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2585~2589
- 刘彬彬, 苑勇贵, 王新星等. 偏振激光干涉仪的非线性误差实时校正方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2585~2589
- 9 Chen Hongfang, Ding Xuemei, Zhong Zhi. Effect of nonlinearity by the nonideal splitting performance of polarization beam splitter in laser heterodyne interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1562~1565
- 陈洪芳, 丁雪梅, 钟志. 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[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1562~1565
- 10 Deng Yuanlong, Li Yuezhi, Wu Yubin *et al.*. Influence of metal mirrors on measurement accuracy in heterodyne interferometric ellipsometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 339~443
- 邓元龙, 李岳峙, 吴玉斌等. 金属反射镜对外差干涉椭圆测量精度的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 339~443
- 11 Li Liyan, Yuan Yonggui, Wu Bing *et al.*. Effect of wave plate on nonlinear error in single-frequency polarized laser interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112009
- 李立艳, 苑勇贵, 吴冰等. 单频偏振激光干涉仪中波片对非线性误差的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112009
- 12 Yuanlong Deng, Xuejin Li, Yubin Wu *et al.*. Analysis of frequency mixing error on heterodyne interferometric ellipsometry [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2007, **18**(11): 3339~3343
- 13 Jinhui Shi, Zhengping Wang. Theoretical analysis of two nonpolarizing beam splitters in asymmetrical glass cubes [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(13): C275~278
- 14 Jinhui Shi, Chunying Guan, Zhengping Wang. Design and analysis of metal-dielectric nonpolarizing beam splitters in a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(18): 3385~3390
- 15 Jiang Haili, Wang Zhengpin. Temperature features of reflection induced retardance of polarization preserving reflecting medium layer [J]. *J. Harbin Engineering University*, 2006, **27**(2): 305~307
- 姜海丽, 王政平. 保偏膜的反射相移温度特性的实验研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2006, **27**(2): 305~307
- 16 Kang Chong, Wang Zhengping, Huang Zongjun *et al.*. Influence of reflection-induced-retardance of non-polarizing beam splitter upon the polarization state of the output light of Faraday mirror optical current transformer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **26**(12): 1857~1860

- 康 崇, 王政平, 黄宗军 等. 无偏振效应分束器反射相移对法拉第镜式光学电流互感器输出光偏振态的影响[J]. 光学学报, 2007, **26**(12): 1857~1860
- 17 Yang Huayong, Lü Haibao, Xu Tao *et al.*. Experiment research for the effect of laser polarization on transmitting-reflecting ratio of beam splitter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(6): 44~47
- 杨华勇, 吕海宝, 徐 涛 等. 激光偏振特性对分光镜分光比影响的实验研究[J]. 光电工程, 2001, **28**(6): 44~47
- 18 Yang Huayong, Lü Haibao, Hu Yongming *et al.*. Influence of polarization and intensity variations of incident beam on transmitting and reflecting intensities of a beam splitter [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(4): 345~348
- 杨华勇, 吕海宝, 胡永明 等. 入射光的偏振和强度对分光镜透/反比的影响[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(4): 345~348
- 19 J. M. De Freitas. Analysis of laser source birefringence and dichroism on nonlinearity in heterodyne interferometry[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 1997, **8**(11): 1356~1359

栏目编辑: 何卓铭