

文章编号 1004-924X(2012)11-2373-07

非偏振分光镜对干涉式椭偏仪测量精度的影响

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:提出了一种新型激光外差干涉椭偏测量术用于实现纳米级精度的薄膜厚度测量。采用偏振光 p 和 s 分量透射比、反射比、反射相移、透射相移共同表征非偏振分光镜(NPBS)的退偏效应,建立了相应的误差模型,从而研究了多层介质膜 NPBS 的退偏效应和方位角对椭偏参数误差的影响。研究表明,由环境温度、入射角和光束偏振态的变化引起的 NPBS 退偏参数的漂移对椭偏测量精度影响很大,且无法通过标定来降低。为实现纳米级测量精度,NPBS 的对准误差需要控制在 0.1° 以内。相对而言,用于合光的 NPBS 方位角误差对测量精度影响较大,NPBS 所导致的膜厚测量总误差约为 $1.8\sim 2.5$ nm,说明 NPBS 是马赫曾德尔干涉式椭偏仪的一个不可忽视的误差源。

关键词: 椭偏测量;干涉式椭偏仪;非偏振分光镜;膜厚测量;退偏效应;方位角误差

中图分类号: TH744.3;O484.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2373

Influence of nonpolarizing beam splitters on measurement accuracy in interferometric ellipsometers

DENG Yuan-long^{1,2*}, LI Xue-jin², GENG You-fu², HONG Xue-ming²

(1. College of Mechatronics & Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Sensor Technology, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding author, E-mail: dengyl@szu.edu.cn

Abstract: A novel heterodyne interferometric ellipsometer was investigated to measure the thicknesses of thin films in the nanometer-accuracy. The depolarization effect of a Nonpolarizing Beam Splitter (NPBS) was characterized by the transmission-induced-retardance (TIR) between p and s components of a polarizing beam, reflectance ratio, transmittance ratio and reflection-induced-retardance (RIR), then a corresponding error model was established. The influence of the depolarization effect and misorientation of a multi-layer dielectric NPBS on the errors of ellipsometric parameters was investigated. Experimental results indicate that the fluctuation of the depolarization effect caused by the environmental temperatures, incident angles and the change of polarizing state has a major impact on the measurement accuracy, and it can not be eliminated by calibration. In order to implement the nanometer-accuracy, the misorientation angle must be smaller than 0.1° . Furthermore, it shows that the

收稿日期:2012-06-01;修订日期:2012-07-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60978041);深圳市科技配套资助项目(No. ZYC201006090091A)

NPBS orientation angle errors for recombination of the measurement light and the reference light have more important contribution than another ones to the measurement accuracy. The thickness measurement error of thin film induced by NPBS is about 1.8–2.5 nm, which means that the NPBS is an assignable error source in the Mach-Zehnder interferometric ellipsometer.

Key words: ellipsometry; interferometric ellipsometer; film thickness measurement; nonpolarizing beam splitter; depolarization effect; misorientation angle

1 引言

椭圆偏振测量仪是目前最重要的薄膜测试工具之一。其中,干涉式椭圆偏振测量仪具有测量速度快、抗干扰能力强等优点,是目前国内外研究热点之一^[1-7]。Hazebroek 等人于 1973 年首次提出了干涉式椭圆偏振测量的概念^[1],针对其中存在的问题,Wind 和 Lin 等人分别提出了使用塞曼激光^[2]和声光调制器^[3]的系统设计,还有人提出采用电光调制^[4]和波长调制半导体激光器^[5]的方案。Watkins 采用压电晶体振荡的方法产生拍频,实验测量了 SiO₂ 膜,最佳测量不确定度可达 360 pm^[6]。以上理论研究和实验表明,干涉式椭圆偏振测量技术对于实时、快速薄膜测量有很好的应用价值与市场潜力,但外差干涉测量中存在的非线性误差是阻碍该技术实际应用的主要原因^[7]。外差干涉测量系统中的非线性误差一直是国内外研究热点^[8-13],研究人员对激光源、偏振分光镜、波片、反射镜等误差源开展了很多研究工作,并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的方法。在激光干涉测量非线性误差研究中,偏振分光镜(Polarizing Beam Splitter, PBS)一直是研究的重点,而对于非偏振分光镜(Nonpolarizing Beam Splitter, NPBS)引入的非线性误差,国内外一直缺乏相应的研究。Hou 等人在迈克尔逊式外差干涉位移测量实验中,观测到 NPBS 引入的测量误差,并发现采用不同激光源,位移非线性误差约为 1.6~2.2 nm^[8],但是论文没有给出相应的理论分析以及 NPBS 对误差的影响机理。

本文针对基于横向塞曼激光器的马赫-曾德尔外差干涉椭圆偏振测量系统,采用琼斯矢量法,首次研究了多层介质膜 NPBS 的退偏效应、方位角对测量精度的影响。

2 系统原理

马赫-曾德尔干涉式椭圆偏振仪原理如图 1 所示。其中,HWP 为半波片,M 为反射镜,D_s 和 D_p 为探测器。横向塞曼激光器输出双频正交线偏振光,频差 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ 。经过 PBS1 分成测量光束 ω_1 和参考光束 ω_2 ,测量光束被薄膜两次反射后,在 NPBS2 与参考光束合光干涉,由 PBS2 分成 p, s 两路外差干涉信号。比较探测器输出的拍频信号幅值和相位差可得到椭圆偏振参数。其中,半波片使得光束偏振方向旋转 45°,这样 p, s 分量近似等强入射到薄膜样品,可提高干涉调制度。

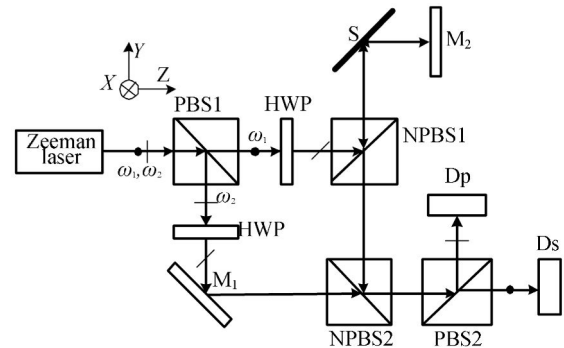


图 1 光学系统原理图

Fig. 1 Schematic of optical configuration

横向塞曼激光器的输出可以表示为:

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

其中: α_1 和 α_2 代表初始相位。系统的琼斯响应可以表示为:

$$\begin{aligned} E_p &= P_R \cdot [B_T \cdot M \cdot H(3\pi/8) \cdot P_R + \\ &B_R \cdot B_T \cdot S \cdot M \cdot S \cdot B_R \cdot H(\pi/8) \cdot P_T] \cdot E; \\ E_s &= P_T \cdot [B_T \cdot M \cdot H(3\pi/8) \cdot P_R + \\ &B_R \cdot B_T \cdot S \cdot M \cdot S \cdot B_R \cdot H(\pi/8) \cdot P_T] \cdot E. \end{aligned} \quad (2)$$

其中,下标 R 和 T 分别代表反射和透射, \mathbf{P} , \mathbf{H} , \mathbf{B} , \mathbf{M} 和 \mathbf{S} 分别表示 PBS、半波片、NPBS、反射镜和薄膜样品的琼斯矩阵,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_R &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{P}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_R &= \mathbf{B}_T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{bmatrix}, \\ \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}(\pi/8) = \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{H}(3\pi/8) &= \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$r_s = |r_s| \cdot \exp(i\varphi_s); r_p = |r_p| \cdot \exp(i\varphi_p). \quad (4)$$

将式(1), (3)和(4)带入式(2)可得:

$$\begin{aligned} E_s &\propto -\frac{1}{4} r_s^2 \cdot \exp[i(\omega_1 t + \alpha_1)] + \exp[i(\omega_2 t + \alpha_2)]; \\ E_p &\propto -\frac{1}{4} r_p^2 \cdot \exp[i(\omega_1 t + \alpha_1)] + \exp[i(\omega_2 t + \alpha_2)]. \end{aligned} \quad (5)$$

忽略不影响结果的常数项,可得两路外差信号的光强如下式所示:

$$\begin{aligned} I_s &\propto \frac{1}{4} |r_s|^2 \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t - 2\varphi_s + \Delta\alpha); \\ I_p &\propto \frac{1}{4} |r_p|^2 \cdot \cos(\Delta\omega \cdot t - 2\varphi_p + \Delta\alpha). \end{aligned} \quad (6)$$

比较式(6)中两路信号的幅值和相位,可得椭圆参数对 (φ, Δ) , 如式(7)所示,从而反演出薄膜厚度和折射率。

$$\Delta = \varphi_p - \varphi_s, \tan(\varphi) = |\rho| = |r_p| / |r_s|. \quad (7)$$

测试样品为单层 ITO 膜,采用原子力显微镜标定,厚度为 120.1 nm,实验存在 5 nm 的膜厚测量误差。其中,PBS 的非理想和激光源输出偏振态畸变会引入混频非线性误差,而 NPBS 也是一个重要的误差源。

3 NPBS 引入的椭圆参数误差

式(6)是假设所有器件均为理想状态下得到的结果。如果考虑到多层介质膜的退偏效应,NPBS 的琼斯矩阵可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_T &= \begin{bmatrix} T_s \cdot \exp(i\tau_s) & 0 \\ 0 & T_p \cdot \exp(i\tau_p) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_R &= \begin{bmatrix} R_s \cdot \exp(i\epsilon_s) & 0 \\ 0 & R_p \cdot \exp(i\epsilon_p) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $T \cdot \exp(i\tau)$ 和 $R \cdot \exp(i\epsilon)$ 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。式(8)可以归一化为:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_T &= \begin{bmatrix} \eta \cdot \exp(i\tau) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_R &= \begin{bmatrix} \kappa \cdot \exp(i\epsilon) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

其中: η, κ 分别是 p, s 分量的透射比和反射比; ϵ, τ 分别是 NPBS 的反射相移和透射相移,如式(10)所示。

$$\eta = T_s/T_p, \tau = \tau_s - \tau_p; \kappa = R_s/R_p, \epsilon = \epsilon_s - \epsilon_p. \quad (10)$$

如果 NPBS 的 p, s 轴方向与图 1 中的 Y, X 轴不完全重合,而是存在一个方位角误差 θ ,则 NPBS 的琼斯矩阵转换为:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_T &= \begin{bmatrix} \eta \cos \theta \cdot \exp(i\tau) & -\sin \theta \\ \eta \sin \theta \cdot \exp(i\tau) & \cos \theta \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_R &= \begin{bmatrix} \kappa \cos \theta \cdot \exp(i\epsilon) & -\sin \theta \\ \kappa \sin \theta \cdot \exp(i\epsilon) & \cos \theta \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

为简化分析过程,首先假设 NPBS2 为理想状态,只将 NPBS1 的琼斯矩阵用式(11)表示。根据上述分析,可得测量信号和参考信号的光强:

$$\begin{aligned} I_p &\propto A_p \cdot \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \beta_p) \\ I_s &\propto A_s \cdot \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \beta_s). \end{aligned} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_p \cdot \exp(i\beta_p) &= -r_s^2 \cdot \eta \cdot \sin \theta \cdot \exp(i\tau) \cdot [\kappa \cdot \cos \theta \cdot \exp(i\epsilon) - \sin \theta] - \\ &\quad r_p^2 \cdot \cos \theta \cdot [-\kappa \cdot \sin \theta \cdot \exp(i\epsilon) + \cos \theta] \\ A_s \cdot \exp(i\beta_s) &= -r_s^2 \cdot \eta \cdot \cos \theta \cdot \exp(i\tau) \cdot [\kappa \cdot \cos \theta \cdot \exp(i\epsilon) - \sin \theta] - \\ &\quad r_p^2 \cdot \sin \theta \cdot [-\kappa \cdot \sin \theta \cdot \exp(i\epsilon) + \cos \theta] \end{aligned} \quad (13)$$

开始测量时,可以用反射镜代替被测薄膜,得到一个用于标定的幅值比 $|\rho|^c$ 和相位差 Δ^c 。这样 NPBS1 引入的椭圆偏参数测量误差就可以表示为:

$$\begin{aligned} \delta|\rho| &= \sqrt{A_p/A_s} / |\rho|^c - |r_p| / |r_s| \\ \delta\Delta &= \frac{(\beta_p - \beta_s) - \Delta^c}{2} - \Delta \end{aligned} \quad (14)$$

如果假设 NPBS1 为理想状态,而 NPBS2 的非理想状态用式(11)表示。根据上述分析,同理可得此时测量信号和参考信号的光强:

$$\begin{aligned} I_p &\propto C \cdot D \cdot \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \beta_C - \beta_D) \\ I_s &\propto E \cdot F \cdot \cos(\Delta\omega t + \Delta\alpha + \beta_E - \beta_F) \end{aligned} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{aligned} C \cdot \exp(i\beta_C) &= -r_s^2 \cdot \kappa \cdot \sin \theta \cdot \exp(i\epsilon) - r_p^2 \cdot \cos \theta, \\ D \cdot \exp(i\beta_D) &= \eta \cdot \sin \theta \cdot \exp(i\tau) + \cos \theta, \\ E \cdot \exp(i\beta_E) &= -r_s^2 \cdot \kappa \cdot \cos \theta \cdot \exp(i\epsilon) + r_p^2 \cdot \sin \theta, \\ F \cdot \exp(i\beta_F) &= \eta \cdot \cos \theta \cdot \exp(i\tau) - \sin \theta, \end{aligned} \quad (16)$$

则 NPBS2 所引入的椭圆偏参数测量误差可以表示为:

$$\begin{aligned} \delta|\rho| &= \sqrt{C \cdot D / E \cdot F} / |\rho|^c - |r_p| / |r_s|, \\ \delta\Delta &= \frac{(\beta_C - \beta_D) - (\beta_E - \beta_F) - \Delta^c}{2} - \Delta \end{aligned} \quad (17)$$

4 误差分析与讨论

NPBS 的玻璃基片折射率为 1.541 6,交错镀 4 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 。NPBS 的光学参数如表 1 所示。

表 1 NPBS 的光学参数

Tab. 1 Optical characteristics of NPBS

偏振分量	R	T	τ /rad	ϵ /rad
s	0.934 1	0.357 1	-0.859 6	2.225 5
p	0.206 4	0.978 5	-1.703 4	1.475 8

注: $\eta=0.364 9, \kappa=4.525 7, \tau=0.843 8, \epsilon=0.749 7$; 符号定义见式(8)~(10)。

4.1 NPBS1 引入的误差分析

根据式(14),用图 2 描述了 NPBS1 的方位角 θ 对椭圆偏参数测量误差的影响。

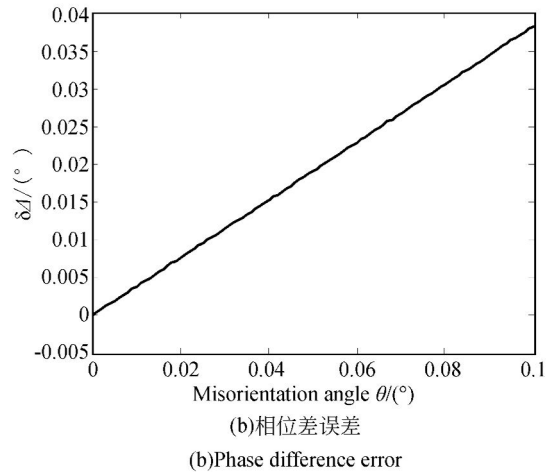
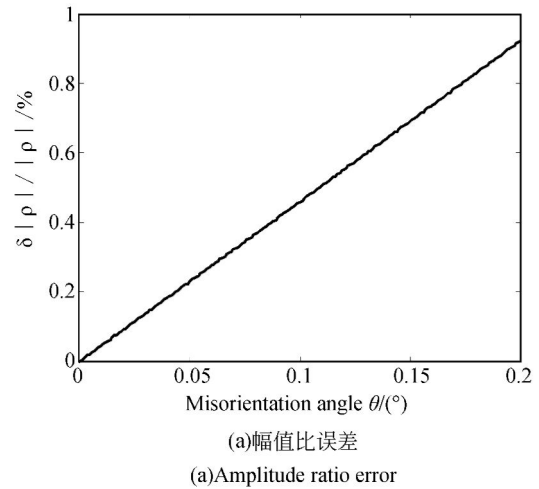


图 2 NPBS1 方位角对椭圆偏参数误差的影响

Fig. 2 EP errors versus misorientation angle θ of NPBS1

由图 2 可知, NPBS1 的对准误差对相位差测量的影响很小。当 $\theta=0.1^\circ$ 时,椭圆偏参数误差约为:

$$\delta\Delta \approx 0.04^\circ; \delta|\rho| / |\rho| \approx 0.45\% \quad (18)$$

假设经过充分调节, NPBS1 不存在方位角误差,即 $\theta=0^\circ$,根据式(14)标定之后, NPBS1 的退偏效应对椭圆偏参数误差的影响可以表示为:

$$\frac{\delta|\rho|}{|\rho|} = \frac{1}{2} \frac{\partial(\eta\kappa)}{\eta\kappa}, \delta\Delta = \frac{\partial(\tau + \epsilon)}{2} \quad (19)$$

由上式可知,通过标定可以消除退偏效应对测量的影响;但是退偏效应的不稳定,即 NPBS 的 p, s 分量透射比 η 、反射比 κ 、反射相移 ϵ 、透射相移 τ 的波动,对椭圆偏测量精度影响很大,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 , 受温度、入射角和入射光束偏振态^[14]的影响。入射角变化 1° , NPBS 的 ϵ 和 τ 变化约 5° , η 和 κ 变化约 5% , 且变化规律不同步^[15-16]; 而温度引起的相移变化率约为 $0.12 (^\circ)/^\circ\text{C}$ ^[17-18]。假设 $\eta \times \kappa$ 和 $\tau + \epsilon$ 分别变化 1% 和 1° , 式(19)给出的椭偏参数误差约为:

$$\delta\Delta \approx 0.5^\circ, \frac{\delta|\rho|}{|\rho|} \approx 0.5\%. \quad (20)$$

此时引入的膜厚测量误差约为 1 nm 。

4.2 NPBS2 引入的误差分析

根据式(17), 用图 3 描述了 NPBS2 的方位角 θ 对椭偏参数测量误差的影响。

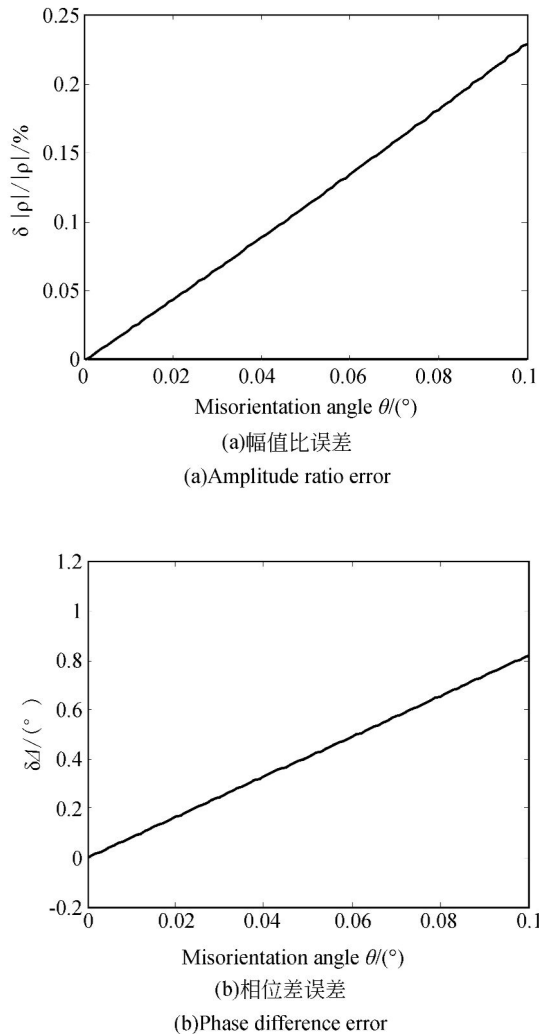


图 3 NPBS2 方位角对椭偏参数误差的影响

Fig. 3 EP errors versus misorientation angle θ of NPBS2

由图 3 可知, NPBS2 的对准误差对相位差测量影响较大。当 $\theta=0.1^\circ$ 时, 椭偏参数误差约为:

$$\delta\Delta \approx 0.8^\circ, \delta|\rho|/|\rho| \approx 0.23\%. \quad (21)$$

根据椭偏基本方程和薄膜参数, 式(21)的椭偏参数误差大约导致 $1\sim 2 \text{ nm}$ 的膜厚测量误差。

假设经过充分调节, NPBS2 不存在方位角误差, 即 $\theta=0^\circ$, 根据式(17)标定之后, NPBS2 的退偏效应对椭偏参数的影响可以表示为:

$$\frac{\delta|\rho|}{|\rho|} = \frac{1}{2} \frac{\delta(\eta\kappa)}{\eta\kappa}, \delta\Delta = \frac{\delta(\epsilon - \tau)}{2}. \quad (22)$$

由于 τ 和 ϵ 的漂移缺乏规律性, 既不同步也不对称, 所以式(22)与式(19)的影响基本等效, 即 NPBS1、NPBS2 退偏参数的漂移对椭偏测量精度的影响基本一致。

将式(18)~(22)椭偏参数误差近似合成, 可得图 1 系统中由 NPBS 引入的膜厚椭偏测量总误差约为 $1.8\sim 2.5 \text{ nm}$, 与文献^[8,19]中的实验数据吻合。

5 结 论

本文针对马赫-曾德尔型外差干涉椭偏测量系统, 研究了多层介质膜 NPBS 的退偏效应和方位角引入的椭偏参数测量误差。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, 由环境温度、入射角和光束偏振态的变化引起的 NPBS 退偏参数的漂移对椭偏测量精度影响很大, 且无法通过标定来降低; 为实现纳米级测量精度, NPBS 的对准误差需要控制在 0.1° 以内。相对而言, 用于合光的 NPBS2 方位角误差对测量精度影响较大, 而测量光路中的 NPBS1 对相位差误差影响很小, 二者的参数漂移对测量精度的影响基本一致。NPBS 所导致的膜厚测量总误差约为 $1.8\sim 2.5 \text{ nm}$, 与 PBS 引入的误差大小相当, 这说明 NPBS 是外差干涉椭偏测量技术中一个不可忽视的误差源。

参考文献:

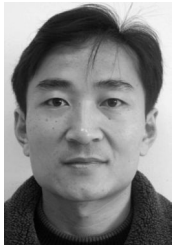
- [1] HAZEBROEK H F, HOLSCHER A A. Interferometric ellipsometry [J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1973, 6:822-826.
- [2] HEMMES K, HAMSTRA M A, KOOPS K R, *et al.*. Evaluation of interferometric ellipsometer systems with a time resolution of one microsecond and faster [J]. *Thin Solid Films*, 1998, 313-314: 40-46.
- [3] LIN CH H, CHOU CH, CHANG K S. Real time interferometric ellipsometry with optical heterodyne and phase lock-in techniques [J]. *Appl. Opt.*, 1990, 29(34):5159-5162.
- [4] CHIU M H, LEE J Y, SU D C. Complex refractive-index measurement based on Fresnel's equations and the use of heterodyne interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(19): 4047-4052.
- [5] WATKINS L R, HOOGERLAND D M. Interferometric ellipsometer with wavelength-modulated laser diode source [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(22): 4362-4366.
- [6] WATKINS L R. Accurate heterodyne interferometric ellipsometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48:114-118.
- [7] ELLIS J D, MESKERSA A J H, SPRONCK J W. Fiber-coupled displacement interferometry without periodic nonlinearity [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3584.
- [8] 候文攻,张运波,许琦欣,等.分光镜对外差激光干涉仪非线性的影响[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(9):163-168.
- HOU W M, ZHANG Y B, XU QI X, *et al.*. Effect of beam splitter on nonlinearity in heterodyne interferometers [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 163-168. (in Chinese)
- [9] 陈洪芳,钟志,丁雪梅.激光外差干涉的非线性误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5):1043-1047.
- CHEN H F, ZHONG ZH, DING X M. Compensation of nonlinear errors in laser heterodyne interferometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1043-1047. (in Chinese)
- [10] 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.
- DENG Y L, LI Y ZH, WU Y B, *et al.*. Influence of metal mirrors on measurement accuracy in heterodyne interferometric ellipsometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(2):339-443. (in Chinese)
- [11] DENG Y L, CHAI J L, XUE X J, *et al.*. Polarization mixing error in transmission ellipsometry with two acousto-optical modulators [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(7): 075601.
- [12] WU CH M, SU CH SH. Nonlinearity in measurements of length by optical interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, 7(1): 62-68.
- [13] EOM T B, CHOI T Y, LEE K H, *et al.*. A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, 13(2):222-225.
- [14] 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.
- YANG H Y, LÜ H B, HU Y M, *et al.*. Influence of polarization and intensity variations of incident beam on transmitting and reflecting intensities of a beam splitter [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(4):345-348. (in Chinese)
- [15] JIN H SH, ZHENG P W. Theoretical analysis of two nonpolarizing beam splitters in asymmetrical glass cubes [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47(13):C275-C278.
- [16] JIN H SH, CHUN Y G, ZHENG P W. Design and analysis of metal-dielectric nonpolarizing beam splitters in a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(18):3385-3390.
- [17] 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.
- JIANG H L, WANG ZH P. Temperature features of reflection induced retardance of polarization preserving reflecting medium layer [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2006, 27(2): 305-307. (in Chinese)
- [18] 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.

KANG CH, WANG ZH P, HUANG Z J, *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. (in Chinese)

[19] DENG Y L, LI X J, WU Y B, *et al.*. Analysis of frequency mixing error on heterodyne interferometric ellipsometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, 18(11): 3339-3343.

作者简介:



邓元龙(1971—),男,安徽滁州人,博士,教授,1994年于清华大学获得学士学位,2007年于天津大学获得博士学位,主要从事测量技术及仪器、光纤传感器等方面的研究。E-mail: dengyL@szu.edu.cn



耿优福(1981—),男,山东临沂人,讲师,2009年于天津大学获得博士学位,主要从事微结构光纤功能器件、光纤传感器等方面的研究。E-mail: gengyf2007@163.com



李学金(1966—),男,黑龙江密山人,博士,教授,2002年于天津大学获得博士学位,现为深圳市传感器技术重点实验室主任,主要从事光纤传感器、检测技术等方面的研究。E-mail: lixuejin@szu.edu.cn



洪学明(1982—),男,广东化州人,硕士,实验员,2010年于深圳大学获得硕士学位,主要从事光子晶体光纤(PCF)传感器、检测技术的研究。E-mail: xm-hong@szu.edu.cn

● 下期预告

单一原子氧辐照对 SR107-ZK 白漆反射率的影响

付瀚毅^{1,2},刘伟奇¹,柳 华¹,魏忠伦¹,康玉思¹,冯 睿¹,卢海平^{1,2}

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2.中国科学院 研究生院,北京 100039)

本文利用反射率退化一般规律数学模型计算出 SR107-ZK 白漆两年衰减后反射率理论值,根据此理论值为光学系统选择了适当的 CCD。按照地球低轨(LEO)飞行两年的太空环境条件,对 SR107-ZK 白漆试块进行单一原子氧辐射试验, 1.8×10^{22} atoms/cm² 原子氧通量辐射后的试验数据结果 0.814 与数学模型模拟计算的数值 0.793 较为接近,结果说明了数学模型理论的正确性;对试验后的试块进行成像试验,现象表明了 CCD 的合理选择是光学系统对反射率下降试块良好成像的关键所在,进一步证实了数学模型的可靠性,为今后此类工作提供了重要依据。