

文章编号: 0258-7025(2007)06-0851-06

波片相位延迟的精确测量及影响因素分析

薄锋^{1,2}, 朱健强¹, 康俊¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 提出一种精确测量波片相位延迟的方法。将待测波片置于起偏器和检偏器之间, 转动待测波片和检偏器至不同的位置并探测输出的光强, 得到波片的相位延迟。采用光源调制技术和解调技术, 抑制了连续光所无法克服的背景光干扰和电子噪声的干扰; 将光路分为测量光路和参考光路, 采用软件除法技术, 消除了光源波动的影响, 从而实现波片相位延迟的精确测量。详细分析了影响测量精度的误差因素, 主要有光源波长变化、温度变化、入射角倾斜、转台转角误差和光源波动, 计算了1064 nm波长时厚度为0.52 mm的 $\lambda/4$ 多级结晶石英波片产生的相位延迟误差, 其中光源波动的影响在作除法后有显著的改善, 各误差因素的总测量误差为 $\pm 1.58^\circ$ 。实际测量了该 $\lambda/4$ 结晶石英波片的相位延迟为 $91.06^\circ \pm 1.78^\circ$, 与理论分析相符。该测量和误差分析方法同样适合其他的波片。

关键词 激光技术; 调制光源和解调技术; 除法技术; 波片; 相位延迟; 精度分析

中图分类号 O 432.2 文献标识码 A

Precise Measurement and Factors Analysis for Phase Retardation of Wave Plate

BO Feng^{1,2}, ZHU Jian-qiang¹, KANG Jun¹

¹Joint Laboratory on High Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract A method for precisely measuring the phase retardation of wave plate is presented. In this method, a test wave plate is placed between a polarizer and an analyzer, with the polarizer and the analyzer being rotated to different position, the output power is tested and the phase retardation of the wave plate is reached. The modulated light source and the demodulation technique are used to erase the noises, which are helpless for continuous light, arise from background light and electronics. Since the light path is divided into measurement light path and reference light path and the software division technique is used, the influence of light fluctuation is eliminated and the phase retardation of wave plate can be measured precisely. Main error factors that degrade the measurement accuracy are analyzed in detail, which are wavelength change of the light source, temperature change of surrounding environment, oblique incidence of the light, rotational angle error of the sample carriers and fluctuation of the light power. Phase retardation errors that arise from the above mentioned factors for a piece of crystal quartz plate with thickness of 0.52 mm and phase retardation being 90° at 1064 nm are analyzed and calculated. The influence of light fluctuation is greatly improved after using division technique, and the total error is $\pm 1.58^\circ$. The quartz wave plate with thickness of 0.52 mm is tested experimentally, and its phase retardation is $91.06^\circ \pm 1.78^\circ$, which consists with the theoretical analysis. Methods about measurement and error analysis can also be used for other wave plates.

Key words laser technique; modulated light source and demodulation technique; division technique; wave plate; phase retardation; accuracy analysis

收稿日期: 2006-10-16; 收到修改稿日期: 2007-01-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(X0401021)资助课题。

作者简介: 薄锋(1971—), 女, 山东人, 博士研究生, 主要从事偏振光和偏振设备的测试和应用方面的研究。

E-mail: fengbo0537@sina.com

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 江苏人, 研究员, 博士生导师, 目前从事激光驱动器的研制工作。

E-mail: jqzhu@mail.shnc.ac.cn

1 引 言

波片常在椭圆偏测量或光学测量中用以改变光的偏振态^[1~3],波片的相位延迟误差对测量结果产生很大的影响,因此对波片进行精确测量是一个非常重要的研究课题。通过探测输出光强实现波片相位延迟测量的方法有很多种,主要有光弹性调制法^[4]、双波片补偿法^[5]、光外差法^[6]等。这些方法大多采用波长为632.8 nm的 He-Ne 激光器连续光源或外调制光源。当采用连续光源时,背景光干扰和光电探测器暗电流会影响测量的精度,而采用外电光调制时整套测量装置体积显得有些庞大。

本文也采用探测光强的方法对波片的相位延迟进行测量,通过误差分析发现光源波动产生的影响很大,成为限制测量精度提高的主要因素,但是在本系统中作软件除法后有非常显著的改善,从而使测量精度大大提高。实际测量了厚度为0.52 mm,在波长1064 nm时为λ/4的结晶石英多级波片的相位延迟。该方法操作简单,易于实现,不仅测量精度高、可靠性好,而且实现了测量的自动化^[7,8]。

2 测量原理

波片相位延迟的自动测量系统如图1所示。待测波片 W 放在起偏器 P 和检偏器 A 之间。光源采用脉冲式调制光源,光束经 45°分束器 BS 后分为两束。其中,反射光作为测量光路,经起偏器 P,待测样品 W 和检偏器 A 后,再经过短焦距透镜聚焦后,由光电探测器 Pd1 接收,将光信号转换为电信号,经过高线性度解调及放大电路后,进行数/模(A/D)转换和数据采集,然后由计算机进行数据处理,以作为光强探测中的分子 I。透射光作为参考光束,经衰

减片后由光电探测器 Pd2 接收,然后经过解调和放大电路,数/模数据采集,将数字信号送入计算机进行处理,以作为光强探测中的分母 I_r。那么经计算机处理后的光强 I_o = I/I_r。

测量光路中,起偏器 P 的透振方向、检偏器 A 的透振方向分别与待测波片 W 某一主轴(快轴或慢轴)方向的夹角 α 和 β 的分布如图 2 所示。

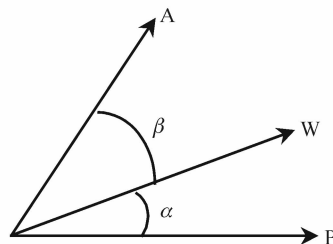


图 2 起偏器 P,检偏器 A 与待测波片 W 方位的夹角
Fig.2 Angles among polarizer P, analyzer A and test wave plate

根据偏振光的干涉叠加原理^[9],由光源出射的椭圆偏光入射到起偏器 P,经待测波片 W 和检偏器 A 后由光电探测器接收,不考虑光学元件材料对光的吸收和反射损失,则输出光强 I_o 为

$$I_o = I_1 (\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + 2 \cos \alpha \cos \beta \sin \alpha \sin \beta \cos \delta), \quad (1)$$

式中 I₁ 为经过起偏器 P 后的光强; δ 为待测波片的相位延迟。

首先,由步进电机 1 带动检偏器 A 转动,使起偏器 P 和检偏器 A 的透振方向平行,接着,由步进电机 2 带动待测波片转动,使待测波片的方位角和 P, A 的透振方向重合,即 α = β = 0°,根据式(1),此时探测到的光强 I_{o1} = I₁; 然后,保持 P, A 的透振方向平行,将波片转动 45°,即 α = β = 45°,此时探测到的光强 I_{o2} = I_{o1} (1 + cosδ) / 2。参考光路中与测量光路同步测量的光强为 I_r。分别将这两种情况下的 α, β, I_{o1} 和 I_{o2} 代入(1)式,经计算机数据处理,并与参考光路做除法,则待测波片的相位延迟 δ

$$\delta = \arccos \left(2 \times \frac{I_{o2}/I_r}{I_{o1}/I_r} - 1 \right). \quad (2)$$

3 测量结果及精度分析

3.1 测量结果

所采用的光源是波长为 1064.2 ± 0.5 nm 的红外固体激光器,调制频率为 8 kHz,从激光器输出的平均光功率为 20 mW,示波器所测得的经过光电转

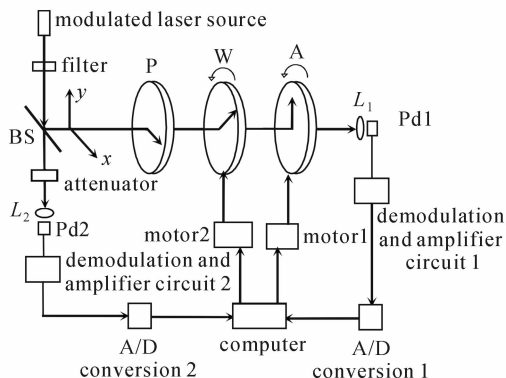


图 1 波片相位延迟的自动测量系统

Fig.1 Automated measurement system for phase retardation of wave plate

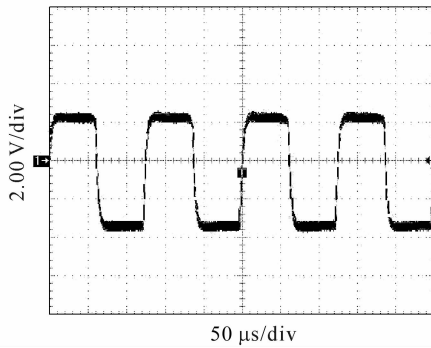


图 3 调制光源的光强信号

Fig. 3 Power signal of the modulated light source

换后且解调前的光强信号如图 3 所示。

实测样品是厚度为 0.52 mm 的结晶石英多级波片,测量温度为 20 ± 1 °C,测得的部分数据如表 1,可得该波片的相位延迟实测为 $91.06^\circ \pm 1.78^\circ$ 。

表 1 波片的相位延迟

Table 1 Phase retardation of wave plate

Number	$\delta / (^\circ)$	Number	$\delta / (^\circ)$
1	92.21	6	91.71
2	88.55	7	88.29
3	88.73	8	92.26
4	91.74	9	92.59
5	92.41	10	92.15

3.2 精度分析

引起波片相位延迟测量误差的因素主要有光源波长变化、入射角倾斜、光源光强波动、温度变化和步进电机失步及其转台的转角偏差。以厚度为 0.52 mm,在波长 1064 nm 时 $\lambda/4$ 的结晶石英为例,分析了各误差因素的影响情况及系统测量精度的改善措施。

3.2.1 光源波长变化

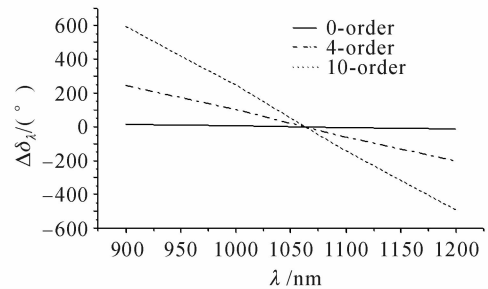
由于 $\delta = \frac{2\pi h(n_e - n_o)}{\lambda} = \frac{2\pi h n}{\lambda}$,式中 h, λ 和 n 分别为待测波片的厚度、光源的波长以及该波长下的双折射率。由光源波长变化引起的相位延迟误差 $d\delta_\lambda$ 为

$$d\delta_\lambda = \delta \left(\frac{dn}{n} - \frac{d\lambda}{\lambda} \right), \quad (3)$$

根据(3)式和各波长下不同的双折射率 $n(n = n_e - n_o)$,对厚度为 0.52 mm,波长在 1064 nm 时的 $\lambda/4$ 结晶石英多级波片,在波长为 1060 nm 和 1070 nm 时产生的误差分别为 5.77° 和 -8.6° 。

图 4 所示是结晶石英在 1064 nm 时 0 级,4 级

和 10 级波片随波长 λ 变化产生的相位延迟误差 $\Delta\delta_\lambda$ 。由图中曲线可知,0 级波片的相位延迟误差最小,波片级次越高,波长变化产生的相位延迟误差越大,对于 10 级波片,在 1028 nm 波长时产生的相位延迟误差达到 150° ,已不再是 90° 的相位延迟。因此,测量多级波片时,应特别注意选择合适的光源波长稳定性范围,以满足要求测量的精度。由此可见,波长变化对相位延迟的测量结果影响很大,特别是多级波片受波长变化的影响更加严重。对不同的波片,测量精度要求越高,对光源波长的准确性要求就越高。

图 4 波长变化引起的结晶石英 $\lambda/4$ 波片的相位延迟误差Fig. 4 Phase retardation errors of $\lambda/4$ wave plate due to wavelength change

测量系统中所采用的光源波长实测为 1064.2 ± 0.5 nm。对于复合零级结晶石英波片,由光源波长波动引起的相位延迟误差 $\Delta\delta_\lambda \approx 0.07^\circ$,而对厚度为 0.52 mm 和 1.25 mm 的波片, $\Delta\delta_\lambda$ 分别为 1.01° 和 2.43° 。

3.2.2 温度变化

温度变化会引起波片厚度和材料双折射率的变化^[10],从而引起相位延迟发生变化。由温度 T 变化引起的相位延迟误差为

$$\Delta\delta_T = \delta \left(\frac{\Delta h_T}{h} + \frac{\Delta n_T}{n} \right), \quad (4)$$

式中 $\Delta h_T/h$ 为垂直于晶体光轴的线膨胀系数; Δn_T 为由温度变化引起的双折射率的变化 ($\Delta n_T = \Delta n_e - \Delta n_o$)。不同材料的波片,线膨胀系数和双折射率随温度变化不同^[11],所产生的相位延迟测量误差也不同,对于受温度变化影响大的材料或多级波片,测量时需控制环境温度的恒定。

对于结晶石英波片,其垂直于晶体光轴的线膨胀系数为 $13.37 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$;在 1064 nm 波长下, $n = 0.00875$; Δn_T 约为 $-1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。图 5 为结晶石英 $\lambda/4$ 波片由温度变化引起的相位延迟误差 $\Delta\delta_T$ 。

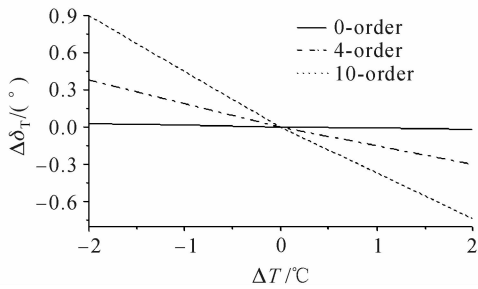


图 5 由温度变化引起的结晶石英 $\lambda/4$ 波片的相位延迟误差

Fig. 5 Phase retardation errors of $\lambda/4$ wave plate due to temperature change

由图 5 可知, 波长为 1064 nm 时, 厚度为 0.52 mm 的 $\lambda/4$ 结晶石英 4 级波片, 温度每减小或增加 1° 产生的误差 $\Delta\delta_T = \pm 0.14^\circ$; 而厚度为 1.25 mm 时, $\Delta\delta_T = \pm 0.384^\circ$ 。

3.2.3 入射角倾斜

图 6 为入射光非正入射, 且入射角为 θ_i 时, o 光和 e 光在波片内分别产生不同的折射角 θ_o 和 θ_e 的情况。波片的相位延迟与入射光线入射角的依赖关系^[12]

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda \cos\theta_2} (n'_e - n_o), \quad (5)$$

式中 θ_2 为 θ_e 和 θ_o 的平均值, $h/\cos\theta_2$ 为倾斜入射时波片的平均等效厚度。

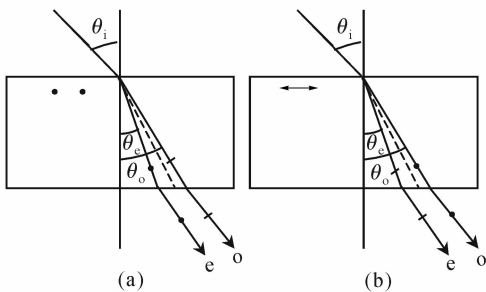


图 6 入射角倾斜在波片中产生的双折射

Fig. 6 Birefringence in wave plate due to oblique incident angle

当入射光为非垂直入射时, 非常光线的折射率 n'_e 为

$$n'_e = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cdot \cos^2 \phi + n_o^2 \cdot \sin^2 \phi}} = n_e \left(1 - \frac{n_e - n_o}{n_o} \cdot \cos^2 \phi \right), \quad (6)$$

式中 ϕ 为波片光轴与波片内 e 光光波法线方向的夹角。当入射角倾斜方向在波片表面的投影与波片光

轴垂直时, 如图 6(a) 所示, $\phi = \pi/2$, 代入(5), (6) 式可得

$$\delta = \frac{2\pi h (n_e - n_o)}{\lambda \cos\theta_2}, \quad (7)$$

取一级近似 $\cos\theta_2 \cong 1 - \frac{\theta_2^2}{2}$, 并且当入射角 θ_i 很小时, $\theta_2 \approx \theta_i/n_a$, n_a 为 n_e 和 n_o 的平均值。可得

$$\Delta\delta_{\theta\perp} = \frac{\pi h (n_e - n_o) \theta_i^2}{\lambda n_a^2}, \quad (8)$$

当入射角倾斜方向在波片表面的投影与波片光轴平行时, 如图 6(b) 所示, $\phi = \frac{\pi}{2} \pm \theta_2$, 同理可得

$$\delta = \frac{2\pi h (n_e - n_o) \cos\theta_2}{\lambda}, \quad (9)$$

取一级近似, 则

$$\Delta\delta_{\theta\parallel} = -\frac{\pi h (n_e - n_o) \theta_i^2}{\lambda n_a^2}, \quad (10)$$

由(8)和(10)式可知, 两种情况产生的相位延迟误差大小相等, 符号相反, 因此在实际分析时, 由入射角倾斜引起的相位延迟误差取 $\Delta\delta_\theta = \pm \frac{\pi h (n_e - n_o) \theta_i^2}{\lambda n_a^2}$ 。该误差 $\Delta\delta_\theta$ 与倾斜的入射角 θ_i 成平方关系, 其关系曲线如图 7 所示。

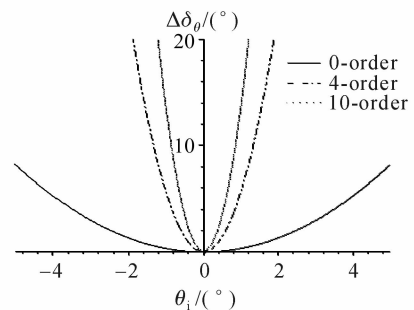


图 7 由倾斜入射引起的结晶石英 $\lambda/4$ 波片的相位延迟误差

Fig. 7 Phase retardation errors of $\lambda/4$ wave plate due to oblique incidence

由图 7 可见, 入射角倾斜对测量结果影响很大, 特别是多级波片对入射角的倾斜非常敏感。对厚度为 0.52 mm 的 $\lambda/4$ 结晶石英波片, 当 $\theta_i = 1^\circ$ 时, 产生的相位延迟误差 $\Delta\delta_\theta$ 为 5.59° ; 而对于厚度为 1.25 mm 产生的误差为 13.44° 。本系统中, 在仔细调整的情况下, 波片在步进电机的控制下旋转一圈时, 实际测量的光点偏离中心的距离小于 2 mm, 而转台与光源的距离为 30 cm, 通过计算可知入射角偏差为 0.4° , 产生的相位延迟 $\Delta\delta_\theta = 0.9^\circ$ 。

3.2.4 转台转角误差

由于步进电机失步、涡轮蜗杆的齿间啮合、摩擦等原因,使分别带动样品和检偏器转动的转台产生转角误差 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 。由(1)式得

$$I_o = \frac{I_1}{2} [1 + \cos 2(\alpha + \beta) + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot (1 + \cos \delta)];$$

当 $\alpha = \beta = 0^\circ$ 时

$$I_{o1} = \frac{I_1}{2} [1 + \cos 2(\Delta\alpha + \Delta\beta) + \sin 2\Delta\alpha \cdot \sin 2\Delta\beta \cdot (1 + \cos \delta)],$$

当 $\alpha = \beta = 45^\circ$ 时

$$I_{o2} = \frac{I_1}{2} [1 - \cos 2(\Delta\alpha + \Delta\beta) + \cos 2\Delta\alpha \cdot \cos 2\Delta\beta \cdot (1 + \cos \delta)],$$

$\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 实测最大值分别为 2° , 此时 $I_{o1} = 0.998I_1$,

$I_{o2} = \frac{I_1}{2} (1.005 + 0.995\cos\delta)$ 。对 $\lambda/4$ 波片,引起的相位延迟测量误差 $\Delta\delta_{\text{eq}} = 0.8^\circ$ 。

3.2.5 光源光强波动

光源光强的波动实测为 5% ,对于 $\lambda/4$ 结晶石英波片,所测光强经计算机处理转化为电压值,并多次测量取平均值后,得到 $I_{o1} = 5.53 \text{ V}$, $I_{o2} = 2.71 \text{ V}$, $I_r = 2.5 \text{ V}$,由式(2)可得,不采用除法时,

$$\delta_{\min} = \arccos \left[\frac{2 \times (I_{o2} + 0.05 \times I_{o2})}{I_{o1} - 0.05 \times I_{o1}} - 1 \right] = 84.82^\circ,$$

$$\text{而 } \delta_{\max} = \arccos \left[\frac{2 \times (I_{o2} - 0.05 \times I_{o2})}{I_{o1} + 0.05 \times I_{o1}} - 1 \right] =$$

96.54° ,因此 δ 波动范围很大,为 11.72° 。加入参考光路与测量光路同步采集数据并做除法后, $\delta_{\min} =$

$$\arccos \left[\frac{2 \times (I_{o2} + 0.05 \times I_{o2}) / (I_r + 0.05 \times I_r)}{(I_{o1} - 0.05 \times I_{o1}) / (I_r - 0.05 \times I_r)} - 1 \right]$$

$= 91.14^\circ$,同理得 $\delta_{\max} = 91.24^\circ$,只产生 0.1° 的误差。由上述分析可见,除法技术消除了光源波动产生的影响。

3.2.6 总误差

通过对各误差源的分析可知,系统的总测量误差^[13] $\Delta\delta$ 包括光源波长变化、温度变化、入射角倾斜、转台转角误差和光源光强波动引起的误差。对厚度为 0.52 mm ,波长为 1064 nm 的 $\lambda/4$ 结晶石英波片的测量误差为

$$\Delta\delta = \pm \sqrt{1.01^2 + 0.14^2 + 0.9^2 + 0.8^2 + 0.1^2} = \pm 1.58^\circ.$$

对于其他的波片,如零级波片或更高级别的多级波片,虽然引起误差的各因素相同,但由于具有不同的

温度系数或不同的双折射率随波长的变化而具有不同的测量误差。

通过上述分析可知,实际测量结果与精度分析结果相吻合,在各误差因素中,光源波动是最大的影响因素,但除法技术的运用,极大地消除了这一影响,从而使测量精度大大提高。

4 结 论

根据偏振光的干涉叠加原理和光强探测技术研制出波片相位延迟的自动测量系统,详细分析和计算了影响测量精度的各误差因素,并对波片的相位延迟进行了实际测量。影响该系统测量精度的误差因素主要有光源波长变化、温度变化、入射角倾斜、转台转角误差和光源波动。其中,温度、入射角和光源波长变化产生的相位延迟误差会随着波片级数的增加而显著增加,因此对于多级波片的测量,应根据要求的测量精度将这三个因素控制在适合的范围内。此外,光源波动的影响很大,当光强波动为 5% 时产生的相位延迟误差为 11.72° ,这往往成为限制测量精度提高的主要因素,但是在本系统中作除法后有显著的改善,只产生 0.1° 的误差,从而使测量精度大大提高。 1064 nm 波长下厚度为 0.52 mm 的 $\lambda/4$ 结晶石英波片产生的相位延迟的总测量误差为 $\pm 1.58^\circ$,该波片的实际测量的相位延迟为 $91.06^\circ \pm 1.78^\circ$,两者相吻合。该测量和误差分析方法对其他波片具有普遍的使用意义。

参 考 文 献

- 1 Stewart R. M. Robertson. Measuring birefringence properties using a wave plate and an analyzer [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22** (14):2213~2216
 - 2 Zhongyao Liu, Dejiao Lin, Hong Jiang *et al.*. Roll angle interferometer by means of wave plates [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, **104**:127~131
 - 3 M. P. Kothiyal, C. Delisle. Optical frequency shifter for heterodyne interferometry using counterrotating wave plates [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(8):319~321
 - 4 B. V. Kuznetsov. Photoelectric modulation method for testing half-wave phase plates [J]. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1985, **52** (12):723~725
 - 5 Carole C. Montarou, Thomas K. Gaylord. Two-wave-plate compensator method for single-point retardation measurements [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(36):6580~6595
 - 6 Lin Yao, Zhou Zhiyao, Wang Runwen. Optical heterodyne measurement of the phase retardation of a quarter-wave plate [J]. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(7):553~555
 - 7 Zhao Qiuling, Wu Fuquan. Optical phase retardation measurement by normalized polarizing modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3):360~362
- 赵秋玲,吴福全. 光相位延迟量的归一化偏振调制测量[J]. 光

- 学学报, 2002, **22**(3):360~362
- 8 Hao Dianzhong, Li Guohua, Wu Fuquan. Intelligentized measurement of optical phase retardation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1411~1414
郝殿中, 李国华, 吴福全. 光相位延迟器延迟量的智能化测量 [J]. 中国激光, 2005, **32**(10):1411~1414
- 9 Liao Yanbiao. Polarized Light [M]. Beijing: Science Press, 2003. 100~103
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 100~103
- 10 Song Lianke, Li Guohua, Dai Zuoxiao *et al.*. Effect of temperature on phase delay of waveplates [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 1997, **8**(6):454~457
宋连科, 李国华, 代作晓 等. 波片延迟相位温度效应研究[J]. 光电子·激光, 1997, **8**(6):454~457
- 11 P. D. Hale, G. W. Day. Stability of birefringent linear retarders (waveplates) [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(24):5146~5153
- 12 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Beijing: Science Press, 1981. 928~931
M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理(下)[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 928~931
- 13 Zhengping Wang, Qingbo Li, Qiao Tan *et al.*. Novel method for measurement of retardation of a quarter-wave plate [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, **36**:285~290

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班教材征订

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班于 2006 年 10 月 27 日胜利闭幕。现有少量讲习班辅导教材征订, 数量有限, 欲购从速。四本教材主要内容包括:

1) 王之江院士、徐文东研究员主讲光学系统设计

光学设计中的基本概念和问题; 光学系统的基本要求及指标、高斯光学、像差理论、成像质量和发展各种不同结构的光学系统的意义等的阐述, 结合现在流行的光学软件设计的基本功能进行介绍, 立足于当前具有代表性的产品设计进行实例的分析和讲解。

2) 朱健强研究员主讲光机系统设计和光学加工

本课程的内容涵盖了光机设计的原理、设计方法及常规内容。介绍各类光学元件加工的各个环节及其相关测控技术, 培养光学工程师所需掌握的必要光学加工工艺知识。平面、球面、透镜、棱镜等光学加工技术、非球面加工技术, 特种光学元件加工技术, 光学检测技术。

3) 范正修研究员主讲光学薄膜

从光学薄膜的一般性质出发, 讲述光学薄膜在激光系统, 光通信系统, 显示系统中的应用, 介绍极紫外和软 X 射线薄膜, 功能性光学薄膜。分析激光对光学薄膜的破坏过程。

教材目录:

《光学加工与检测技术》、《光学机械设计》、《光学设计》、《光学薄膜及其应用》。

征订形式:

- 1) 全套教材或电子版: 400 元
- 2) 全套教材+电子版: 500 元
- 3) 单本教材+电子版: 150 元

优惠办法:

中国光学期刊网会员购买全套教材赠送价值 100 元的期刊阅读卡一张。

征订办法:

联系人: 高老师 电话: 021-69918253 邮箱: gfhai@siom.ac.cn

邮购方法:

请直接汇款到以下地址:

邮编: 201800 地址: 上海市嘉定区清河路 390 号 收款人: 光学期刊联合编辑部