

文章编号: 1001-3806(2008)02-0215-03

## $\lambda/4$ 光学薄膜相位延迟器的温度特性

闫 斌, 吴福全\*, 郝殿中, 张 旭, 毕 佳, 郑萌萌  
(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 线偏振光正入射到薄膜相位延迟器的表面时, 透射光的相位延迟量随温度的变化出现扰动, 扰动影响了透射偏振光的质量。为了研究相位延迟量随温度的变化特性, 采用归一化测量法测出了相位延迟量随温度的变化并对变化进行了系统的分析。研究表明, 透射光的相位延迟量与膜料的折射率, 基底与膜料之间的应力以及膜料之间的应力等因素有关。研究相位延迟量与温度之间的变化关系, 对于实验精度与实验误差分析具有重要的现实意义。

关键词: 薄膜; 反射相移; 结构角; 应力; 温度  
中图分类号: O484.4 文献标识码: A

### Temperature features of $\lambda/4$ optical thin-film phase retarder

YAN Bin, WU Fu-quan, HAO Dian-zhong, ZHANG Xu, BI Jia, ZHENG Meng-meng  
(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract** When the linearly polarized light is incident normally, the transmitted light's phase delay appears the perturbation along with the change of the temperature. In order to study phase delay along with temperature's change characteristic, normalized measurement was adopted. The results indicated that the transmitted light's phase delay was related to the membrane material's refractive index, the stress between the membrane and base or the membrane and membrane as well as other factors. Research of the relations between the phase delay and the temperature change plays vital practical role in the experimental precision and the experimental error analysis.

**Key words** thin film; reflective phase shift; structure angle; stress; temperature

### 引 言

相位延迟器可以使透过它的振动方向互相垂直的两束光波彼此之间产生一定的相位差, 是一类重要的光学器件, 同其他偏光器件相配合, 可以实现光的各种偏振态之间的相互转换、偏振面的旋转等。如  $\lambda/4$  波片 (产生  $90^\circ$  的相位延迟) 常用来将线偏振光转换成圆偏振光或椭圆偏振光, 亦或将椭圆偏振光转变为线偏振光。薄膜相位延迟器具有较高的激光损伤阈值, 可用于高功率激光系统中; 可应用于紫外、可见直至红外波段的较长波长范围以及较大的孔径角等特点, 相对于传统的相位延迟器来说有更大的优越性。线偏振光正入射到薄膜相位延迟器的情况下, 透射光的相位延迟量随温度的变化出现扰动, 扰动的出现影响了透射偏振光的质量进而会影响系统的灵敏度和稳定性。但在大多数情况下, 人们认为相位延迟量是恒定不变的, 而实际上当系统的温度发生变化时, 一方面, 光源的输

出波长会发生改变; 另一方面薄膜的热膨胀系数与基底不同, 温度改变幅度过大时, 严重的膜层与膜层间会错位; 窄带滤光片中心波长随温度变化而飘移就可以看出薄膜的折射率也会随温度而微量改变<sup>[1-6]</sup>。研究相位延迟量随温度的变化关系, 对于实验操作以及实验结果的分析都具有重要的现实意义。

### 1 $\lambda/4$ 光学薄膜相位延迟器原理及设计

当光线垂直于入射端面时, 光线在菱体内部的传播情况如图 1 所示, 光线在菲涅耳菱体两个全反射面

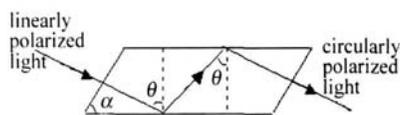


Fig 1 Ray's transmission in Fresnel retarder

产生的总相位延迟量为  $\delta$  由全反射相变公式可得<sup>[7]</sup>:

$$\tan \frac{\delta}{2} = \frac{\cos \theta \sqrt{\sin^2 \theta - n^2}}{\sin^2 \theta} \quad (1)$$

$$\delta = 2 \arctan \left[ \frac{\cos \theta \sqrt{\sin^2 \theta - n^2}}{\sin^2 \theta} \right] \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为光线在菲涅耳菱体两个全内反射面上的入射角,  $n$  为菱体的折射率。从 (2) 式可以看出, 相位延

作者简介: 闫 斌 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为薄膜光学。

\* 通讯联系人。E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-19; 收到修改稿日期: 2007-02-28

迟量  $\delta$  是全反射角  $\theta$  和基底折射率  $n$  的函数。对上式进行微分处理, 给出了相位延迟量  $\delta$  随全反射角  $\theta$  的变化梯度:

$$S_0 = \frac{\partial \delta}{\partial \theta} = \frac{2n \sin \theta (\cos^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 1)}{(n^2 \sin^2 \theta - \cos^2 \theta)(n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2}} \quad (3)$$

对于给定的材料 ( $n_1$  一定), 当  $S_0 = 0$  时, 即:

$$\cos^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 1 = 0 \quad (4)$$

时, 光线通过菱体后产生的相位延迟量随入射角变化的稳定性应该最好。

实验中选用 Zba<sub>f</sub> 玻璃为基底材料, 采用的结构角为 46.95°。用 TFCALC 膜系设计软件对菱体的两个全反射面分别进行优化设计, 使入射光线通过一个全反射面后能产生 0° 的相位延迟, 其膜系结构为 G / (a1)  $\lambda/4$  ir 监控波长为 533nm; 通过另一个全反射面后产生的相位延迟量为 90°, 其膜系为 G / (m)  $\lambda/4$  (m)  $\lambda/4$  ir 监控波长为 625nm。采用的镀膜材料分别为 MgO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。其中 h 代表高折射率材料 TiO<sub>2</sub>, l 代表低折射率材料 SiO<sub>2</sub>, m 和 a 分别代表中间折射率材料 MgO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

## 2 测试与理论分析

### 2.1 测量原理

测量原理光路如图 2 所示, L 为光阑, P<sub>0</sub>, P<sub>1</sub> 为线

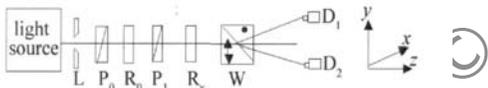


Fig 2 Schematic plan of measure principle

起偏器, R<sub>0</sub> 为  $\lambda/4$  波片, R<sub>x</sub> 为待测延迟器, W 为 Wollaston 棱镜, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub> 为相同的两个探测器, 其中 R<sub>x</sub> 放在有保温罩的温度实验平台上, 其平台的温度调节范围 -20°~80°, 精度为 0.01°。现在, 用一偏光分束器将经由待测元件调制的光分成振动方向正交的两束, 利用两个探测器同时探测两光强信号  $I_1(\delta, \theta, \beta)$  和  $I_2(\delta, \theta, \beta)$  [8-10]。

定义参数:

$$K(\delta, \beta, \theta) = \left[ \frac{I_1(\delta, \beta, \theta + \frac{\pi}{2}) I_2(\delta, \beta, \theta)}{I_1(\delta, \beta, \theta) I_2(\delta, \beta, \theta + \frac{\pi}{2})} \right]^{1/2} \quad (5)$$

式中,  $\theta$  为光经 P<sub>1</sub> 后电矢量与 x 轴的夹角,  $\beta$  为光经 W 后一透射光电矢量与 x 轴的夹角, 则另一透射光电矢量与 x 轴成  $\beta + \pi/2$  角。用该参数表征待测相位延迟量, 降低了对光源稳定性的要求, 可以有效地提高系统的测量精度。从上式看出, 待测样品的延迟量  $\delta$  只和线起偏器 P<sub>2</sub> 透射光的光矢量和 x 轴的夹角  $\alpha$  以及渥拉斯顿棱镜的方位角  $\beta$  有关, 在实验中为方便起见, 令

$\beta = 0^\circ$ , 则上式变为:

$$K(\delta, \beta, \theta) = \frac{1}{\sin^2 \frac{\delta}{2} \sin^2 \theta + \cos^2 \frac{\delta}{2} \cos^2 \theta} - 1 \quad (6)$$

在实验中, 只要测出  $\theta$  角及对应的两个探测器的示数, 代入 (5) 式和 (6) 式, 就可以算出对应的相位延迟量。

用图 2 中的光路测出器件相位延迟量的变化与温度的关系曲线, 见图 3。从图上可以看出, 器件的相位

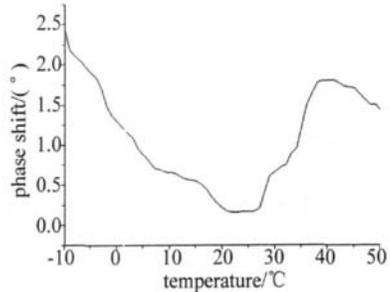


Fig 3 The relation shape between phase shift's change and temperature. 延迟量随温度的变化而改变, 在室温附近 (20°C ~ 28°C) 器件的相位延迟量随温度的变化比较缓慢, 当温度从 5°C 降到 -10°C 的过程中, 相位延迟量的改变非常大; 当温度从 28°C 逐渐变化到 50°C 的过程中, 相位延迟的改变量先增大, 然后又逐渐减小。

### 2.2 薄膜折射率影响

薄膜的折射率随温度的变化而发生微量改变。对于单层膜来说, 在有些情况下膜料折射率的微量变化可以忽略不计。但测试的样品是一个多层膜系的结构, 所以必须考虑膜料折射率的变化对延迟量的影响。对于作者设计的 0° 的经典膜系 G / (a1)  $\lambda/4$  ir 当薄膜的折射率发生变化时 (假定每种膜料折射率的变化均为 +0.5%), 运用膜系设计软件模拟了当膜层的折射率发生变化时, 相位延迟量的改变, 如图 4 所示。曲线

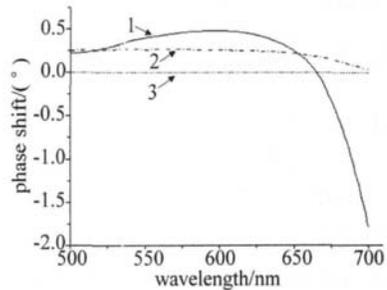


Fig 4 Phase shift's change follow with the change of coating materials's refractive index. 1—two materials refractive index changed, 2—one material's index changed, 3—material's refractive index changed

1 表示有两种膜料的折射率发生变化时相位延迟量的改变量, 曲线 2 表示当有一种膜料的折射率改变时相位延迟量的改变量, 曲线 3 表示膜料的折射率不变化时相位延迟量的变化量。从图上可以看出, 曲线 1 和曲线 2 的相位延迟量相对于曲线 3 有明显的改变。即

在膜系结构相同和入射光线一定的情况下,当温度的变化引起膜料折射率改变时,此时器件相位延迟量的改变量不可忽略。在实际情况下,当温度变化时,不同膜层膜料折射率变化的百分比不一样,相位延迟量随温度的变化更复杂。膜料的折射率随温度的变化应该是相位延迟量随温度发生变化的主要原因。

### 2.3 热膨胀系数及光源波长改变的影响

真空镀膜过程中,膜料的原子或分子急剧的冷却凝附在基板上,分子之间有不规则的微观结构,膜料内部存在内应力,另外膜料与基板之间也存在应力。由于膜料之间以及膜料与基板之间的热膨胀系数不一样,当温度发生变化时,应力也随之发生变化。应力的变化会使光波波面发生形变,严重的会使膜层发生错位,改变膜系的结构。实验温度变化在一定的可控范围内,所以会使光波波面发生一定程度上的变形,进而影响了反射光的相位延迟量<sup>[11]</sup>。

当温度发生变化时,光源的输出波长与基体的折射率也会发生变化。当基体的折射率发生改变时,对于给定的结构角  $Q$  由 (4) 式可以看出,此时相位延迟量对结构角的微分不再为 0。这种变化实质上降低了光源在入射面的准直性,对出射光的相位延迟量也产生了影响。

### 2.4 研究的现实意义

实验过程中,激光光源垂直入射到相位延迟器的入射面,光源具有一定的功率范围。在实验过程中,为了降低光源的波动来提高实验精度,一般要将调整完毕的实验光路稳定一段时间。在调整完实验光路直至实验完毕的过程中,激光束有一部分能量传递到薄膜上,使得薄膜的温度发生变化。由图 3 可以看出,当薄膜的温度发生变化时,相位延迟量也随之发生变化。对精度要求较高的实验,在实验过程中要注意稳定温度这一试验条件:将相位延迟器放到恒温罩中,稳定其温度;或者当实验进行 40min ~ 60min 左右时,关闭光源,让系统自然冷却 30min 左右再做实验。对试验数据进行处理以及对试验误差进行分析时,合理考虑温度变化造成的影响,能在一定程度上简化数据分析过程。

## 3 结 论

由于膜料与基底之间以及膜料之间的热膨胀系数不同,膜料的折射率与温度变化之间有关联等原因,导致了出射光的相位延迟量与温度之间产生了敏感的对立关系。出射光相位延迟量的变化,在一定程度上降低了实验系统的精密性与测量精度。了解相位延迟量与温度之间的关系,对于实验中实验条件的稳定以及实验误差的分析,具有重要的现实意义。

### 参 考 文 献

- [1] JIANG H L, WANG Z P. Temperature features of reflector induced retardance of polarization-preserving reflecting medium layer [J]. Journal of Harbin Engineering University 2006 27(4): 305-307 (in Chinese).
- [2] JIANG H L, WANG Z P, LIU Q B, *et al*. Theoretical study of effect of temperature features of polarization preserving reflecting layer on sensitivity of Bulk Glass optical current transformers [J]. Acta Photonica Sinica 2004 33(12): 1453-1455 (in Chinese).
- [3] LI H X, WU F Q, SHU F F. The effect of temperature on the polarizing prisms [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 266-269 (in Chinese).
- [4] JIA ZH A, QIAO X G, LIM, *et al*. The influence of temperature on reflected wavelength shift of fiber Bragg gratings [J]. Laser Technology 2004 28(3): 309-311 (in Chinese).
- [5] WEIX Q, ZHENG Q G, WU X G, *et al*. Fluctuation characteristic of material temperature and laser power [J]. Laser Technology, 2000, 24(3): 292-296 (in Chinese).
- [6] HAO D Zh, WU F Q, KONG W J. The design and test of thin film polarizing beam splitting prism [J]. Laser Technology 2004, 28(4): 401-403 (in Chinese).
- [7] BORN M, WOLT E. Principles of optics [M]. Beijing Science Press 1978 74-77 (in Chinese).
- [8] HAO D Zh, LI G H, WU F Q. Intelligentized measurement of optical phase retardation [J]. Chinese Journal of Lasers 2005 32(10): 1411-1414 (in Chinese).
- [9] HUANG JB, ZHANG DW, ZHANG DP, *et al*. Investigation on properties of reflection phase retarder [J]. Chinese Journal of Lasers 2005 32(6): 761-764 (in Chinese).
- [10] ZHAO Q L, WU F Q. Testing research of achromatics phase retarder's spectral character [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis 2003 23(1): 28-30 (in Chinese).
- [11] NIX W, LU JHE A Zh, *et al*. Study of damage mechanism of optical dielectric film by high power laser [J]. Laser Technology, 1994 18(6): 348-351 (in Chinese).