

文章编号: 0258-7025(2005)02-0277-04

氧碘激光器相位延迟片的制备与性能研究

黄建兵^{1,2}, 王英剑¹, 邓志¹, 邵建达¹, 范正修¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所光学薄膜技术中心, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 多层介质反射镜在非正入射的时候,两个不同的偏振态之间会产生不同的相移。利用矩阵法,根据菲涅耳公式和电磁场边界条件,推导出 p, s 波的相移。通过优化设计,入射角为 54° , 在 $1285 \sim 1345 \text{ nm}$ 之间 p, s 波获得了 $270^\circ \pm 1^\circ$ 的相移,同时也使反射率在 99.5% 以上。用离子束溅射技术制备相位延迟膜,用分光光度计测试了光谱特性和用椭圆偏仪测试了相位特性,在相应波段获得了 $262.4^\circ \pm 1.8^\circ$ 的相移,同时也使反射率在 99.6% 以上。误差的主要来源是离子源工作特性会产生不均匀的过渡层和最外层会吸收一些水气、灰尘等也产生表面过渡层。由误差分析得出了制备过渡层的物理厚度和折射率的变化情况,最外层的厚度误差和折射率偏差是发生相移偏小的主要因素。

关键词 薄膜;相移;反射式;氧碘激光器

中图分类号 O 484.1 文献标识码 A

Investigation on Preparation and Performance of Phase Retarder in Chemical Oxygen-Iodine Laser

HUANG Jian-bing^{1,2}, WANG Ying-jian¹, DENG Zhi¹, SHAO Jian-da¹, FAN Zheng-xiu¹

¹R&D Center for Optical Thin Film Coatings, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract When incoming light beam enters dielectric reflective mirror with certain incident angle, there is phase shift between the p -polarization and s -polarization. In terms of Fresnel formulas and boundary conditions of electromagnetic field, the phase shift between p - and s -polarization was deduced with methods of matrix. Based on optimizing design, when light beam enters with 54 degree incident angle, phase shift of $270^\circ \pm 1^\circ$ in the range of $1285 \sim 1345 \text{ nm}$ was reached, at the same time, the reflectivity of dielectric mirror maintained is over 99.5% . The phase retarder was prepared with dual ion beam sputter system and then annealed at different temperatures in atmosphere, the spectrum and the phase of the sample were gained by spectrometer and the Fourier transform infrared spectroscopic ellipsometer, respectively. The results revealed that the as-deposited samples gained phase shift of $262.4^\circ \pm 1.8^\circ$ and the reflectivity reaches over 99.6% . The error mainly originates from non-homogeneous transition layer, posed by working properties of ion source, and surface transition layer, resulting from surface adsorption for moisture and dust. The physical thickness and variety of refractive index for transition layer were gained from error analysis, and it was found that the error of the outermost layer and deviation of refractive index and designed values play a principal roles in decrease of phase shift.

Key words thin films; phase shift; reflection-induced; chemical oxygen-iodine laser

1 引 言

反射式相位延迟器能对入射偏振光的 p, s 分量

的相位发生改变,从而产生一定的相移,但是并不影响其高的反射率^[1,2]。 $\lambda/4$ 相位延迟器(QWR)对每

收稿日期:2003-11-05;收到修改稿日期:2004-01-05

作者简介:黄建兵(1976—),男,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事高功率低损耗激光薄膜的研究以及特殊薄膜的设计与制备。E-mail:laserhjb9@mail.siom.ac.cn

个波长在主角范围内,均能获得 $\pm 90^\circ$ 相移^[3],即对入射线偏振光产生 $\pm 90^\circ$ 相位变化^[4],把线偏振光变成圆偏振光,反之亦然。该类器件在具有波片功能的同时,还可用作光束相移转向器件及光束相移平移器件等,这些功能是透射波片所不具备的^[5]。

反射式相位延迟片有平板薄膜型、棱镜型和三棱锥型,后两种几何对称性相对要求较高。平板薄膜型分为1片型即单片相移为 $\pm 90^\circ$,2片型即单片相移为 $\pm 45^\circ$,4片型即单片相移为 $\pm 22.5^\circ$,1片型设计与制作要求较高,但是使用方便,后两种设计与制作相对容易,但是使用不太方便。

本文对入射角为 54° 全介质层的相位延迟片进行设计,并用离子束溅射沉积方法进行制备,同时用分光光度计测试了光谱特性和用椭偏仪测试了相位特性,最后对相位特性进行误差分析。

2 理论基础

多层膜的特征矩阵设为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A & jB \\ jC & D \end{bmatrix}. \quad (1)$$

膜的复折射率为 N ,由于单层膜的特征矩阵为

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} \cos\delta_i & -\frac{j}{\eta_i} \sin\delta_i \\ -j\eta_i \sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} N_i d_i \cos\theta_i$,对于 s 波 $\eta_s = N_0 \cos\theta_i$, p 波 $\eta_p = N_i / \cos\theta_i$ 。

对于 L 层膜,其特征矩阵为

$$\mathbf{M} = \prod_i^L \mathbf{M}_i, \quad (3)$$

在入射介质中,存在正方向行进的和负方向行进的两种波,设为 E_0^- , E_0^+ ,根据菲涅耳公式和电磁场边界条件,可得多层介质膜的 p,s 分量的反射系数为

$$r_p = \frac{E_{0p}^-}{E_{0p}^+} = \frac{A_p \eta_0 + jB_p \eta_0 \eta_g - jC_p - D_p \eta_g}{A_p \eta_0 + jB_p \eta_0 \eta_g + jC_p + D_p \eta_g}, \quad (4)$$

$$r_s = \frac{E_{0s}^-}{E_{0s}^+} = \frac{A_s \eta_0 + jB_s \eta_0 \eta_g - jC_s - D_s \eta_g}{A_s \eta_0 + jB_s \eta_0 \eta_g + jC_s + D_s \eta_g}, \quad (5)$$

由于 A_p, B_p, C_p, D_p 和 A_s, B_s, C_s, D_s 均为实数,则令

$$\begin{aligned} E_{p1} &= A_{p1} \eta_0 + B_{p1} \eta_0 k_g - D_{p1} \eta_{g1}, \\ E_{p2} &= B_{p1} \eta_0 \eta_g - C_{p1} + D_{p1} k_g, \\ F_{p1} &= A_{p1} \eta_0 + B_{p1} \eta_0 k_g + D_{p1} \eta_{g1}, \\ F_{p2} &= B_{p1} \eta_0 \eta_{g1} + C_{p1} - D_{p1} k_g, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{则 } r_p = \frac{E_{p1} + jE_{p2}}{F_{p1} + jF_{p2}} = |r_p| e^{j\phi_p}, \quad (7)$$

$$\text{式中 } |r_p| = \frac{\sqrt{2(E_{p1}^2 F_{p1}^2 + E_{p2}^2 F_{p2}^2)}}{F_{p1}^2 + F_{p2}^2},$$

$$\phi_p = \text{atan}\left(\frac{E_{p1} F_{p1} - E_{p2} F_{p2}}{E_{p1} F_{p1} + E_{p2} F_{p2}}\right),$$

同理可得

$$r_s = \frac{E_{s1} + jE_{s2}}{F_{s1} + jF_{s2}} = |r_s| e^{j\phi_s}, \quad (8)$$

$$\text{式中 } |r_s| = \frac{\sqrt{2(E_{s1}^2 F_{s1}^2 + E_{s2}^2 F_{s2}^2)}}{F_{s1}^2 + F_{s2}^2},$$

$$\phi_s = \text{atan}\left(\frac{E_{s1} F_{s1} - E_{s2} F_{s2}}{E_{s1} F_{s1} + E_{s2} F_{s2}}\right),$$

则膜的 p,s 分量的相移为

$$\Delta\phi = \phi_p - \phi_s. \quad (9)$$

3 设计要求与实例

通常,单片式相位延迟器要求以一定的角度入射,在使用波长处,使得其反射率高于99%和相移为 $\pm(90^\circ \pm 10^\circ)$ 。对于入射光源为1315 nm的氧碘激光器,设定其入射角为 54° ,选用折射率为1.52的基底,采用的材料是 Ta_2O_5 和 SiO_2 。初始膜系采用常用的高反膜系,即 $\text{Sub}/g1(\text{HL})^{a1} g2(\text{HL})^{a2} g3(\text{HL})^{a3} g4(\text{HL})^{a4} g5(\text{HL})^{a5} g6(\text{H})^{a6}/\text{Air}$,其中 $g1, g2, g3, g4, g5, g6$ 代表的是 $\lambda/4$ 周期膜层前的系数,即这些 $\lambda/4$ 周期膜层的参考波长是不一样的; $a1, a2, a3, a4, a5, a6$ 代表的是 $\lambda/4$ 周期膜层的周期数, H 代表的是高折射率材料 Ta_2O_5 , L 代表的是低折射率材料 SiO_2 。选取的优化目标是在1285~1345 nm之间,其反射率大于99.5%和相移为 270° 。设计结果如图1所示。

4 制备与测量结果

采用双射频离子束溅射镀膜机制备,其中一个为16 cm的溅射源,另一个为12 cm的辅助源。 Ar 和 O_2 供给射频离子源和靶材,溅射源的 Ar 流量为 $0.8 \text{ cm}^3/\text{s}$,射频中和器的 Ar 流量为 $0.08 \text{ cm}^3/\text{s}$,辅助源的 Ar 和 O_2 的流量比1:4($0.05 \text{ cm}^3/\text{s}:0.2 \text{ cm}^3/\text{s}$),吹向靶材的 O_2 的流量为 $0.42 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。其溅射靶材是纯度为99.999%的 SiO_2 和纯度为99.999%的 Ta , Ta_2O_5 是由 Ta 溅射后和与纯度为99.995%的 O_2 反应生成。其本底真空为 $4.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$,制备过程中其真空为 $4.8 \times 10^{-2} \text{ Pa}$,烘烤温度为 136°C 。

为了准确地实现所设计的膜系,分别对每种材

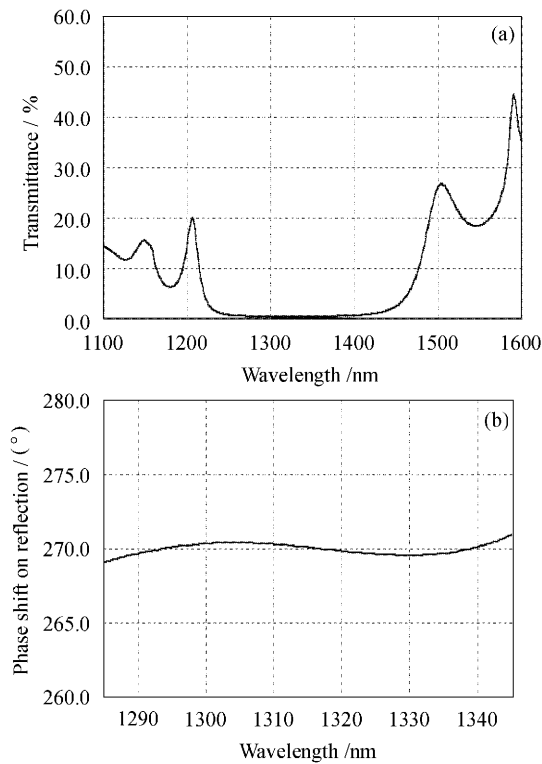


图 1 设计的透射率(a)和相移特性(b)

Fig.1 Performance of transmittance (a) and phase shift (b) of design sample

料薄膜的折射率和沉积速率进行定标。膜层的物理厚度是用时间控制法来实现的。首先用一定的时间做一定厚度的单层薄膜,然后测量出其光谱曲线,根据 Cauchy 公式准确地确定出其折射率和物理厚度^[6]。最后分别算出沉积速率: Ta₂O₅ 为 0.272 nm/s; SiO₂ 为 0.225 nm/s,其折射率如表 1 所示。

表 1 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 的折射率

Table 1 Refractive index of Ta₂O₅ and SiO₂

Material	λ /nm			
	1013	1168	1353	1500
Ta ₂ O ₅	2.085	2.080	2.076	2.074
SiO ₂	1.476	1.475	1.473	1.472

采用 PERKIN Elmer Lambda 900 分光光度计对 1 号样品和 2 号样品同一次制备的 ϕ 30 mm 样品 1 号和 2 号进行测量,其透过率曲线如图 2 所示。

在测量过程中,可能会有入射角度的误差,同时还测量了 1 号样品的 0° 角的透过率曲线,其与理论曲线的比较如图 3 所示。

采用红外傅里叶椭圆偏仪对 1 号和 2 号样品进行测量,其结果如图 4 所示。

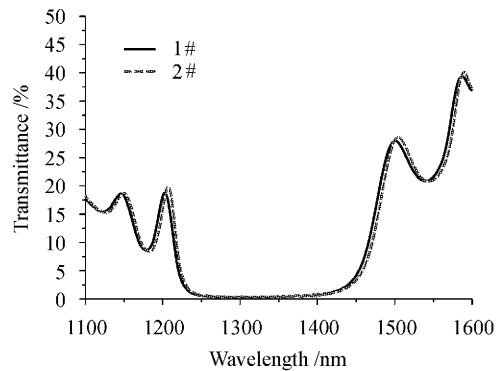


图 2 在 54° 下样品的测量光谱特性

Fig.2 Spectrum performance under 54 degree of experimental sample

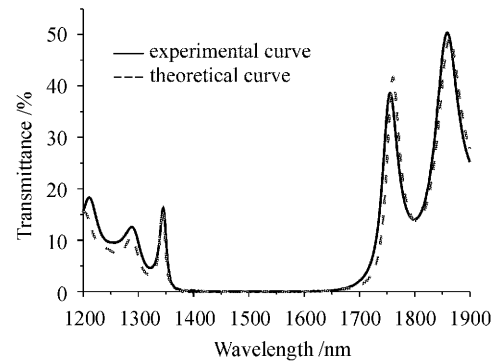


图 3 在 0° 下光谱特性的测量值和理论值比较

Fig.3 Experimental and theoretic spectrum under 0 degree of sample

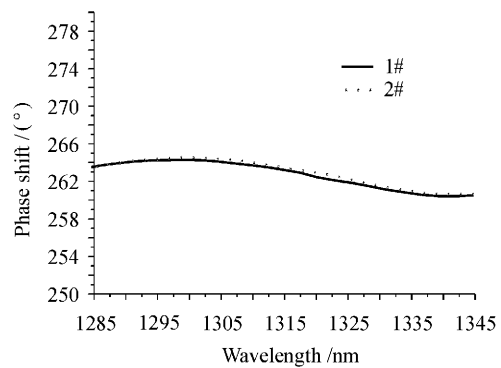


图 4 在 54° 下的样品相移特性

Fig.4 Phase shift performance under 54 degree of experimental sample

从图 2~4 可见,其光谱曲线与设计值相差较小,说明反射率对制备误差很不敏感;但是其相移与 270° 差 6°~7°,因此主要对相移进行误差拟合分析,如图 5 所示。

由于膜层最初的几十层对相移的影响很小,可以忽略不计。则主要分析最后 10 层对相移的影响。

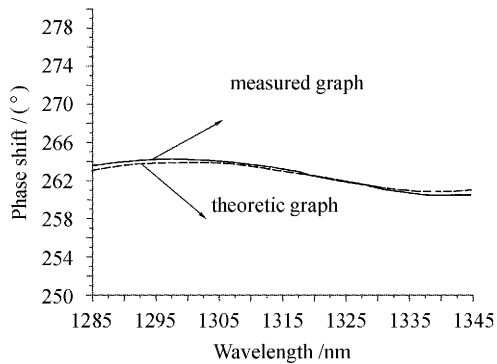


图 5 在 54° 下的样品测量和拟合相移特性

Fig. 5 Experimental and fitting phase shift performance under 54° of sample

使用的溅射镀膜机,在每次换靶至正常的过程中,离子源会以相对较低的功率运作,同时辅助源也会存在同样的过程。在此过程中,由于离子源和辅助源的功率较小,会导致在这一段时间内膜层的折射率会小一些,即产生了一个不均匀的过渡层。在最外层,膜层也会吸收一些水气、灰尘等,也产生一个表面过渡层。

对于膜层之间的过渡层,根据离子源功率的变化情况,估计出过渡层的物理厚度和折射率:H层的物理厚度为 $6\sim 12$ nm,折射率为 $1.96\sim 2.02$;L层的物理厚度为 $10\sim 15$ nm,折射率为 $1.46\sim 1.47$;至于表面过渡层,通常其物理厚度为 $10\sim 15$ nm,折射率为 $1.95\sim 2.00$ 。根据以上分析进行优化拟合,获得膜层之间的过渡层中H层的物理厚度为 9.41 nm,折射率为 2 ;L层的物理厚度为 12.86 nm,折射率为 1.463 。至于表面过渡层,通常其物理厚度为 13.2 nm,折射率为 1.97 。

拟合值与测量值还有偏差可能是由于测量角度误差、测量时的热噪声误差等所致。

5 结 论

通过设计,在 $1285\sim 1345$ nm 之间 p,s 波获得了 $270^\circ\pm 1^\circ$ 的相移,同时也使反射率在 99.5% 以上。用离子束溅射技术制备相位延迟膜,用红外傅里叶椭圆偏仪测量相移,在相应波段获得了 $262.4^\circ\pm 1.8^\circ$ 的相移,符合使用设计要求。用 PERKIN Elmer Lambda 900 分光光度计测量,其反射率在 99.6% 以上。使用界面过渡层和表面过渡层方法分析了制备误差。

参 考 文 献

- 1 Jian Liu, R. M. A. Azzam. Infrared quarter-wave reflection retarders designed with high-spatial-frequency dielectric surface-relief gratings on a gold substrate at oblique incidence [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28):5557~5562
- 2 M. M. K. Howlader, R. M. A. Azzam. Periodic and quasiperiodic nonquarterwave multilayer coatings for 90-deg reflection phase retardance at 45-deg angle of incidence [J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(3):869~875
- 3 Wang Zhengping, Ruan Shunling, Sun Weimin *et al.*. Reflecting prism-petarders with a single medium layer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6):555~560
王政平,阮顺龄,孙伟民等.单层介质膜反射棱镜式光学相位延迟器件研究[J]. *光子学报*, 1997, **26**(6):555~560
- 4 W. H. Southwell. Multilayer coating design achieving a broadband 90° phase shift [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(16):2688~2692
- 5 Eberhard Spiller. Totally reflecting thin-film phase retarders [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(20):3544~3549
- 6 Yuan Jingmei, Tang Zhaosheng, Qi Hongji *et al.*. Analysis of optical property for several ultraviolet thin film materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8):984~988
袁景梅,汤兆胜,齐红基等.几种紫外薄膜材料的光学常数和性能分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8):984~988