

文章编号: 0253-2239(2004)09-1169-4

90°反射式相位延迟器的设计

黄建兵 王英剑 方明 洪瑞金 邵建达 范正修
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 铜蒸气激光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。通过优化设计,在490~530 nm之间 p、s 波获得了 90°的相移,同时也使反射率在 99.998%以上。Ag 层的厚度对于相移不敏感,并且当其厚度大于一定值的时候,对反射率没有影响。根据误差分析,制备薄膜时其沉积速率精度控制在±1%以下,在光谱范围内能达到±15.28°的相移误差,相移均在504 nm处附近存在有一个收敛值。折射率的变化控制在±1%以下,在光谱范围内能达到±12.77°的相移误差。最外层厚度变化±1%,其相移变化达到±5.5°,2~5层和9~16层对相移的影响也在0.5°之上,其余各层对相移影响非常的小。使用时的入射角控制在±1°时,在光谱范围内能达到±2.86°的相移误差。在530 nm附近的波段对入射角不敏感。

关键词: 薄膜光学; 相移; 90°; 反射式; 容差分析

中图分类号: O484 文献标识码: A

Design of 90° Reflection-Induced Phase Retarder

Huang Jianbing Wang Yingjian Fang Ming Hong Ruijin Shao Jianda Fan Zhengxiu
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 15 May 2003; revised 26 December 2003)

Abstract: When copper vapour laser mirror is used at an abnormal incidence the different phase shift of the polarization states may occurred. An optimum technique has been used to determine the layer thickness for a coating design that produce a 90° phase shift between the p- and s-polarization components over 490~530 nm while the average reflectivity is above 99.998%. The thickness of Ag layer is insensitive to the phase shift. There is no effect on the transmittance when the thickness is larger than a constant. A tolerance analysis indicates that the deposition rate should be controlled within ±1% to achieve ±15.28° phase shift error, with a convergence of the phase shift about 504 nm. The phase shift error could reach ±12.77° within ±1% of the refractive index variation over the designed wavelength range. The variation of the outmost layer's thickness also is controlled within ±1% to achieve ±5.5°, and the phase shift error caused by the layers from 2 to 5 and 9 to 16 is above ±0.5°, but the other film layers have little influence on the phase shift. The incidence angle also is controlled within ±1% to achieve ±2.86° phase shift error over the designed wavelength range, the waveband around 530 nm is insensitive to the incident angle.

Key words: film optics; phase shift; 90° reflection-induced; tolerance analysis

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]。λ/4 相位延迟器(QWR)对每个波长在主角范围内,均能获得±90°相移^[3],即对

入射线偏振光产生±90°相位变化^[4],把线偏振光变成圆偏振光^[5],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^[6]。

反射式相位延迟器有平板薄膜型、棱镜型和三棱锥型,平板薄膜型又分为1片型即单片相移为±90°、2片型即单片相移为±45°、4片型即单片相移为±22.5°,1片型设计与制作要求较高,但是使用方便,

E-mail: laserhjb9@mail.siom.ac.cn

收稿日期:2003-05-15;收到修改稿日期:2003-12-26

后两种设计与制作相对容易,但是使用不太方便;棱镜型和三棱锥型的几何对称性相对要求较高。

最简单的相位延迟器是镀一层金属膜,金属有很高的反射率^[7],但是金属膜有以下三个缺点:1) 反射波 p、s 分量相差较大;2) 每一种金属只能在较小的范围内获得相位延迟;3) 对于某一入射角只能获得特定的相位值。而金属膜与介质膜的组合能克服金属膜的上述缺点。因此,本文讨论的是在基底上镀一层金属膜,然后在金属上镀介质膜,从而获得高反射率的相位延迟器。

本文主要设计了在入射角为 54° 的金属和介质层的相位延迟器,同时研究了制膜过程中膜厚和折射率的变化、每一层膜光学厚度的变化和入射角对相位延迟器的相位特性的影响。

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 $\eta_{si} = N_i \cos \theta_i$, p 波 $\eta_{pi} = N_i / \cos \theta_i$ 。

对于 L 层膜,其特征矩阵为

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

把 Ag 膜和基底等效成基底,其折射率设为 $\eta_g = \eta_{g1} - jk_g$ 。

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

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

则

$$r_p = \frac{E_{p1} + jE_{p2}}{F_{p1} + jF_{p2}} = |r_p| \exp(j\varphi_p), \quad (7)$$

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

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

同理可得

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

式中

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

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

则膜的 p、s 分量的相移为

$$\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_s. \quad (9)$$

3 设计实例

我们选用折射率为 1.52 的基底,设定其入射角为 54°, 其入射光源为波长 510 nm 的铜蒸气激光,采用的材料是 Ta_2O_5 、 SiO_2 以及 Ag, 其折射率分别为 2.07, 1.47 和 $0.05 - j2.87$ 。我们初始膜系采用常用的高反膜系,即 $G/\text{Ag } g_1(\text{hl})^2 g_2(\text{hl})^{15} g_3(\text{hl})^2 g_4(\text{hl})^2 g_5(\text{hl})^2 g_1(\text{h})/\text{Air}$, 其中 g_1, g_2, g_3, g_4, g_5 代表的是周期膜层前的系数, 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 490~530 nm 之间,其反射率大于 99.99% 和其相移为 90°。由于 Ag 的厚度对于相移不敏感,并且当其厚度大于一定值的时候,对反射率没有影响,所以无需对 Ag 进行优化。经过一系列的组优化之后,我们获得其各个组的系数: $g_1 = 1.74, g_2 = 1, g_3 = 1.02, g_4 = 1.28, g_5 = 1.11$ 。根据以上膜系,获得其设计反射率大于 99.998% 和相移为 88°~95°。如图 1 所示。

在设计这个相位延迟器的膜时,采用了 p 阶膜评价函数的组合,即

$$F = \sum_i r_i \left\{ \sum_\lambda \omega_\lambda [\gamma_\lambda - f(\lambda)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (10)$$

式中 r_i 为权重因子, ω_λ 为对应于波长 λ 的那一波段的长度, γ_λ 为在每一波长处的所需计算项的目标值, $f(\lambda)$ 是当前波长 λ 处的实际计算值。在本设计实例中,对于 490~530 nm, R_p, R_s 的目标值为 1, 相移的目标值为 90°。

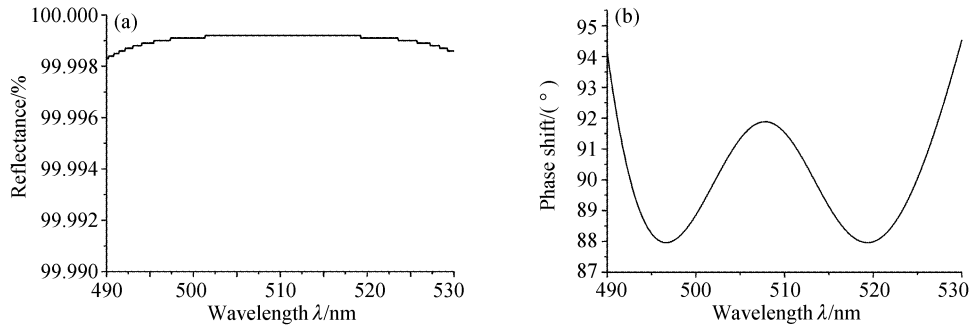


Fig. 1 Performances of reflectance and phase shift in the designed wavelength range

4 误差分析

对于制备和使用反射式相位延迟器来说,我们需要确定其制备精度和使用的容差范围,这就需要分析其在制备时的膜厚误差控制和敏感层的控制,尽可能的扩大角度使用范围。

4.1 物理厚度误差对相位的影响

图 2 中横坐标代表波长范围,纵坐标代表 p、s 的相移差。图 2(a)是膜厚发生正态变化,图 2(b)是膜厚发生均匀变化,两图中的曲线从上向下代表膜厚从 +1% 变化到 -1%,其变化间隔为 0.2%。

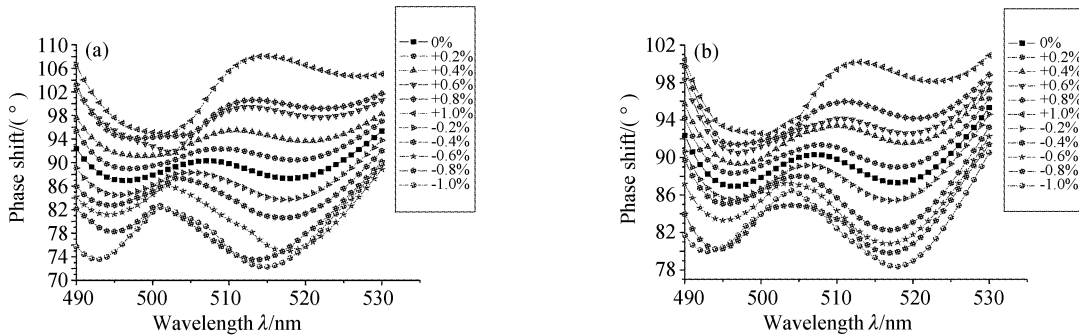


Fig. 2 Results analysis where layer physical thickness varies in a normal and uniform random fashion with 1%, 0.8%, 0.6%, 0.4%, 0.2% and no deviation

从图 2 可以看出,在 510 nm 处相移在 74.93° 和 105.49° 与 82.44° 和 99.39° 之间变化。两图中的相移均在 504 nm 处附近存在有一个收敛值。

是折射率发生均匀变化,两图中的曲线从上向下代表折射率从 +1% 变化到 -1%,其变化间隔为 0.2%。

4.2 折射率误差对相位的影响

图 3 中横坐标代表波长范围,纵坐标代表 p、s 的相移差。图 3(a)是折射率发生正态变化,图 3(b)

从图 3 可以看出,在 510 nm 处其相移分别在 81.12° 和 98.35° 与 76.58° 和 102.12° 之间变化,折射率对 510 nm 处附近相移是影响比较大的。

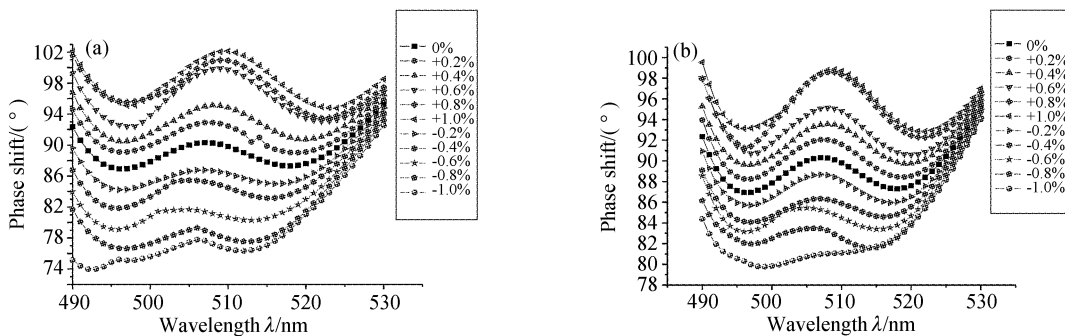


Fig. 3 Results analysis where refractive index varies in a normal and uniform random fashion with 1%, 0.8%, 0.6%, 0.4%, 0.2% and no deviation

4.3 每一层的光学厚度误差对相位的影响

图 4 中横坐标代表膜的层数,纵坐标代表相移的变化。横坐标从左向右代表从基底向入射介质过渡,图中曲线每一个点说明只有该点处的膜层光学厚度发生变化而其它膜层是不变的,上面的曲线代表其每点处的光学厚度变化+1%,下面的曲线代表其每点处的光学厚度变化-1%。

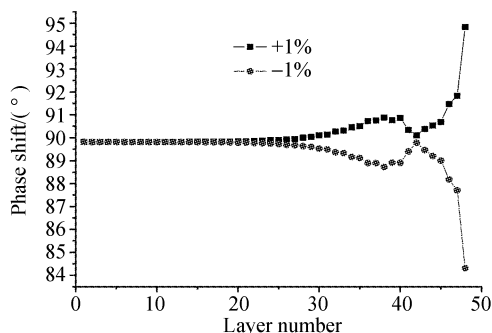


Fig. 4 Phase shift error of layer position when the single layer is increased and decreased by 1%

从图 4 可以看出,最外层对相移影响非常的大,其相移变化达到 5.5° ,这是由于 Ta_2O_5 与入射介质的折射率相差较大所造成的。此外,2~5 层和 9~16 层对相移的影响也在 0.5° 之上,其余各层对相移影响非常的小,最后的 Ag 层数对相移无影响。

4.4 入射角的误差对相位的影响

图 5 中横坐标代表波长范围,纵坐标代表相移。图 5 中的曲线从上向下代表入射角从 55° 变化到 53° ,其变化间隔为 0.5° 。

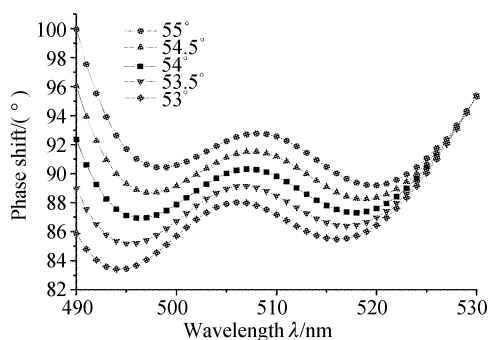


Fig. 5 Design performance when the angle of incident is changed by 0.5° , 1° and 0°

从图 5 可以看出,在 510 nm 处其入射角的变化范围为,其相移也在 87.16° 和 92.56° 之间变化。同时我们也发现,在 530 nm 附近的波段对入射角不敏感。

结论 通过设计,在 Ag 层加镀介质膜,对于 490~530 nm 之间,在保证其设计反射率大于 99.998% 时,相移的变化为 $88^\circ\sim 95^\circ$ 。同时由误差分析可得:膜厚的变化对相移的影响最大,折射率的变化对相移的影响次之,入射角的变化对相移影响相对较小。临近入射介质的几层对相移的影响比靠近基底的几层大的多,靠近基底膜层对相移基本上没有影响。

本文主要针对相移为 90° 设计,在误差分析中发现的有关现象,如膜厚变化使得相移均在 504 nm 处附近存在有一个收敛值;折射率对 510 nm 处附近相移是影响比较大的;在 530 nm 附近的波段对入射角不敏感,到目前还不是很清楚,有待进一步分析。

参 考 文 献

- 1 Liu Jian, Azzam R M A. Infrared quarter-wave reflection retarders designed with high-spatial-frequency dielectric surface-relief gratings on a gold substrate at oblique incidence. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5557~5562
- 2 Howlader M M K, Azzam R M A. Periodic and quasiperiodic nonquarterwave multilayer coatings for 90-degree reflection phase retardance at 45-degree angle of incidence. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(3): 869~875
- 3 Azzam R M A, Howlader M M K. Bilayer coatings that produce a 90° different reflection phase shift at oblique incidence: all possible solutions. *The Solid Films*, 1995, **272**: 143~147
- 4 Southwell W H. Multilayer coating design achieving a broadband 90° phase shift. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(16): 2688~2692
- 5 Zhao Qiuling, Wu Fuquan. Optical phase retardation measurement by normal ized polarizing modulation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3): 360~362 (in Chinese)
- 6 Wang Zhengping, Ruan Shunling, Sun Weimin *et al.*. Reflecting prism-petarders with a single medium layer. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1997, **26**(6): 555~560 (in Chinese)
- 7 Apfel J H. Graphical method to design multilayer phase retarders. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(6): 1024~1029