

文章编号: 0258-7025(2010)12-3133-07

金属介质组合 270° 反射式宽带相位延迟膜设计

李 星^{1,2} 黄建兵¹ 魏朝阳¹ 王胭脂^{1,2}

(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 100049)

摘要 对激光实现由线偏振光转变成圆偏振光的偏振态调制, 需要引入 90° 或 270° 相位延迟器。设计中选择金属介质组合, 光学性能优良的 Ag 膜作为金属层, 利用 Gires-Tournois (G-T) 腔调节相位, 通过优化介质膜堆, 在 45° 入射角和 1000~1100 nm 波段, 所得相位延迟为 270°±1°。通过误差分析可知, 在现有膜厚控制精度下, 控制敏感层容差, 在设计带宽内可得到反射率 $R \geq 99.9\%$ 和相位延迟偏差 $\delta\phi < 7.2^\circ$ 。

关键词 薄膜; 金属-介质膜; 宽光谱; 相位延迟; 容差分析; G-T 腔

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3133

Metal-Dielectric Multilayer Coating Design Achieving Broadband and High-Reflectance and 270° Phase Retardation

Li Xing^{1,2} Huang Jianbing¹ Wei Chaoyang¹ Wang Yanzhi^{1,2}

¹ Research and Development Center for Optical Thin Film Coatings,
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract 90° or 270° phase retarder is introduced to change the polarization of light from linear to circular. The combination of metal and dielectric is used in this design. The silver thin film with excellent optical quality is used as the metal layer. 270°±1° phase shift between p- and s-polarization component as well as broadband high reflection multilayer coatings is designed by optimizing dielectric layers in the wavelength range 1000 ~ 1100 nm at 45°. The errors produced in manufacturing and using process are also analysed. Under the manufacturing precision nowadays, more attention ought to be paid to ensure that the phase shift error $\delta\phi < 7.2^\circ$ and reflectivity over 99.9% are achieved in the 1000~1100 nm spectral region for use at 45°.

Key words thin films; metal-dielectric film; broadband spectrum; phase shift; error analysis; G-T cavity

1 引 言

相位延迟器可以改变入射光的偏振态。相对于波片, 薄膜型相位延迟器可以做到大口径, 并且能对指定的波段进行设计和制备。薄膜型相位延迟器一般分为全介质相位延迟器和金属介质组合膜相位延迟器。对于全介质相位延迟器, 国内外做了大量研究, 设计和制备了 90° 和 270° 相位延迟器^[1~6], 但需要较多的膜层, 而且只能在特定的波段实现高反射

和相位延迟, 带宽较窄, 很难在长波段得到宽带高反相位延迟器。金属 Ag 具有宽角谱、宽光谱、偏振效应小, 而且在可见和红外区都有很高的反射率^[7]。利用金属介质组合膜既可以减少膜层数又可以在长波段实现宽带高反相位延迟。R. M. A. Azzam 等设计的膜为非规整膜系, 制备时会引入较大系统误差, 带宽相对比较窄, 黄建兵等设计的金属介质组合膜相位延迟器容差较小^[8~11], 相位延迟偏差达到±10°

收稿日期: 2010-05-25; 收到修改稿日期: 2010-08-02

作者简介: 李 星(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事金属介质组合膜的设计与制备等方面的研究。

E-mail: xlee@siom.ac.cn

导师简介: 黄建兵(1976—), 男, 博士, 副研究员, 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等方面的研究。E-mail: laserhjb9@mail.siom.ac.cn

以上,同时也忽略了 Ag 与基底以及 Ag 与介质层的粘附性较差的弱点,不能够实际应用。为弥补上述不足,本文设计出性能优良的金属与介质组合型宽带高反相位延迟器,并且分析了制备过程中膜厚、折射率以及入射角的变化对相位延迟器反射率和相位特性的影响。

2 相位延迟器理论基础

设计采用 Gires-Tournois (G-T) 腔调节相位^[12~14],如图 1 所示。

当光从部分反射面进入腔内,在腔内振荡后,从同一侧射出的时候,理论上出射光场与入射光场的

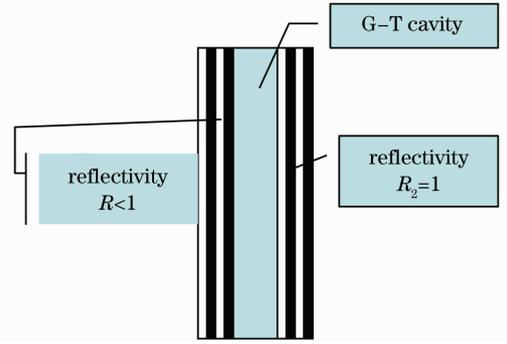


图 1 G-T 腔示意图

Fig. 1 Schematic of G-T cavity

振幅相同,只是相位随不同波长发生改变,作为多次反射光干涉的结果的合成振幅反射系数为^[15]

$$r = r_1^+ + t_1^+ r_2^+ t_1^- \exp(-2i\delta) + [t_1^+ r_2^+ t_1^- \exp(-2i\delta)][r_1^- r_2^+ \exp(-2i\delta)] + [t_1^+ r_2^+ t_1^- \exp(-2i\delta)][r_1^- r_2^+ \exp(-2i\delta)]^2 + \dots = \frac{r_1 + r_2 \exp(-2i\delta)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2i\delta)}, \quad (1)$$

式中 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}nd \cos \theta$ 是腔的有效相位厚度, n 为腔介质折射率, d 为腔长, λ 和 θ 分别为入射光的波长和入射角。其中 1,2 面上的反射系数分别为 $r_1 = r_{10} \exp(i\Phi_1)$, $r_2 = r_{20} \exp(i\Phi_2)$ 。

如果界面 1 为部分反射,其反射率为 R ,界面 2 是理想的全反射面,可设定 $r_{20} = 1$, $\Phi_2 \approx 0$,则振幅反射系数为

$$r = \frac{r_1 + \exp(-2i\delta)}{1 + r_1 \exp(-2i\delta)}, \quad (2)$$

由于复反射系数的模为 1,入射光场会无损耗反射出来,但是由于在腔内多次反射,相位延迟发生改变。

因此反射光的相位变化为^[16]

$$\phi = -\arctan \frac{(1-R) \sin 2\delta}{2\sqrt{R} \cos \Phi_1 + (1+R) \cos 2\delta}, \quad (3)$$

则膜系的反射率为

$$R_{\text{total}} = rr^*, \quad (4)$$

p,s 分量的相位延迟为

$$\Delta\phi = |\phi_p - \phi_s|. \quad (5)$$

3 设计实例

在入射角为 45° ,参考波长为 1064 nm,Ag 膜厚度超过 70 nm 时,Ag 膜上 p,s 分量的反射率差和相位延迟趋于常数^[17],因此在设计中对 Ag 的厚度设为 100 nm,并且在设计过程中保持不变,同时选用 K9 玻璃作为支撑基底。设定其入射角为 45° ,参考

波长为 1064 nm,在该波长处 Ag 的折射率为 $0.234 - j7.214$ 。鉴于 Ag 与基底以及 Ag 与介质层的粘附性较差^[18],所制备的相位延迟器不能实用,因此采用 Al_2O_3 作为过渡层提高 Ag 与基底及 Ag 与介质层的粘附性,在 1064 nm 处的折射率为 1.754, TiO_2 和 SiO_2 组成介质膜系提高反射率和调节相位延迟,在 1064 nm 处的折射率分别为 2.299 和 1.449。整个膜系结构如图 2 所示。

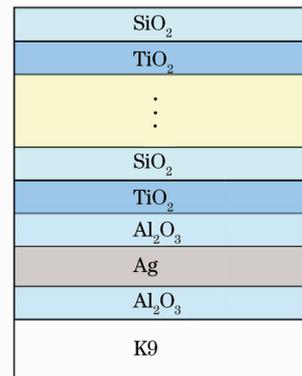


图 2 膜系结构

Fig. 2 Multilayer coatings structure

鉴于 Ag 膜在红外波段具有很高的反射率以及相位延迟保持常数,采用初始膜系为高反膜系加上相位膜系,高反膜系主要用来补偿由于 Ag 膜吸收造成的损失并提高该膜系反射率,相位膜系主要用来调节相位,在设计相位膜系时增加 G-T 腔辅助调节相位,对相位部分的实现至关重要。即 $G/0.6A/g_1(A)g_2(HL)g_3(2H2L)^3g_4(HL)2g_5(2H)$

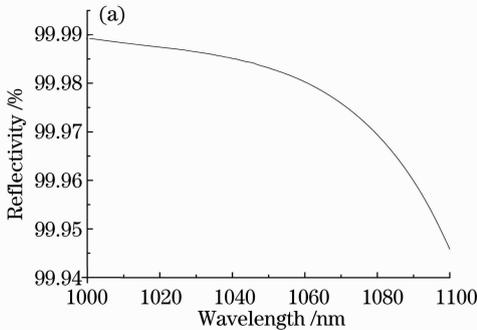
$g_6(\text{HL})^3 \text{HLHL}/\text{Air}$, 其中 G 代表的是基底 K9 玻璃, A 代表光学厚度为 $1/4$ 波长过渡层材料 Al_2O_3 , M 代表的是物理厚度为 100 nm 的金属 Ag, H 代表光学厚度为 $1/4$ 波长的高折射率材料 TiO_2 , L 代表光学厚度为 $1/4$ 波长的低折射率材料 SiO_2 , g_1, g_2, g_3, g_4, g_6 代表的是周期膜层前系数, g_5 为 G-T 腔前系数。该相位延迟器的设计波段 $\Delta\lambda = 1000 \sim 1100$ nm, 参考波长 $\lambda = 1064$ nm, 入射角 $\theta = 45^\circ$, 目标为相位延迟 $\Delta = 270^\circ$, 反射率 $R \geq 99.9\%$ 。对于该设计中, 在 Ag 膜上 Al_2O_3 层不仅能够起到增强 Ag 与 TiO_2 之间粘附力的作用, 而且对整个膜系的光学性质也有一定影响^[19]。

采用的优化评价函数为

$$F = \sum_i r_i \left\{ \sum_\lambda \omega_\lambda [y_\lambda - f(\lambda)]^2 \right\}^{1/2}, \quad (6)$$

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, y_λ 为在每一波长处的所需计算项的目标值, $f(\lambda)$ 是当前波长处的实际计算值。

在膜系优化过程中, 同时运用组优化和层优化两种方式, 组优化即为对周期膜层前的系数进行优化, 层优化即为只对需要优化的膜层进行优化, 优化目标为 $\Delta\lambda = 995 \sim 1105$ nm, 相位延迟 $\Delta = 270^\circ$, 反射率 $R \geq 99.9\%$ 。该设计可以应用的容差为: 反射



率 $R \geq 99.9\%$, 相位延迟 $\Delta = 270^\circ \pm 10^\circ$ 。

为达到这样的要求, 利用初始膜系优化得到的膜系表达式为: $G/0.6A/M/0.6A0.95(\text{HL})0.56(2\text{H}2\text{L})^31.02(\text{HL})^22.05(2\text{H})0.85(\text{HL})^30.64\text{H}0.81\text{L}0.8\text{H}1.58\text{L}/\text{Air}$ 。该设计实例的每层厚度分布如图 3 所示, 其中第 16 层为该设计所引入的 G-T 腔, 在优化时对目标相位的实现有至关重要的作用。

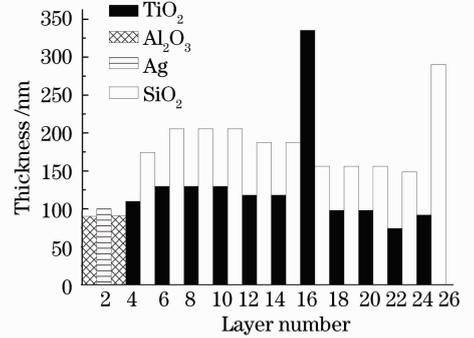


图 3 膜系每层厚度

Fig. 3 Physical thickness of each layer

据此, 设计实例结果在入射角 $\theta = 45^\circ$, 波段 $\Delta\lambda = 1000 \sim 1100$ nm 内, 反射率 $99.945\% \leq R \leq 99.989\%$, 平均反射率 $\bar{R} = 99.978\%$, 相位延迟 $269.2^\circ \leq \Delta \leq 270.8^\circ$, 平均相位延迟 $\bar{\Delta} = 270.1^\circ$ 。设计结果如图 4 所示。

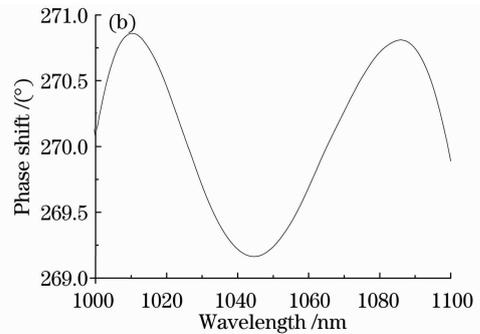


图 4 1000~1100 nm 内的反射率(a)和相位延迟(b)

Fig. 4 Reflectivity (a) and phase shift (b) in the spectrum region 1000~1100 nm

4 容差分析

对于该设计实例, 综合考虑实验镀膜设备能达到的制备精度来进行设计, 就需要对膜系容差进行分析, 为制备提供保证, 后续工作将对该设计进行制备, 同时还需要考虑温湿环境等对样品相位延迟的影响^[20,21]。对于目前的镀膜设备及水平, 制备精度能够控制在 $\pm 1\%$ 以内, 所以下面分析都以 $\pm 1\%$ 作为最大设计容差。

4.1 物理厚度误差对反射率和相位的影响

制备相位延迟器时, 每层薄膜的厚度根据各自的工艺水平呈现随机分布, 所以, 必须对此进行制备容差分析, 利用在设计波段内平均反射率和平均相位延迟进行分析。图 5(a), (b) 中横坐标为每层膜物理厚度独立随机均匀改变的幅度为 $-1\% \sim +1\%$, 间隔为 0.2% 。纵坐标分别为平均反射率和平均相位延迟随各层物理厚度随机改变相应的幅度

造成的变化,可见,平均反射率偏差和平均相位延迟偏差随膜厚均匀改变的幅度变大而增加,平均反射率为 99.975%~99.980%,平均相位延迟为 265.75°~273.71°。

图 6 显示的是每层膜物理厚度高斯型随机独立

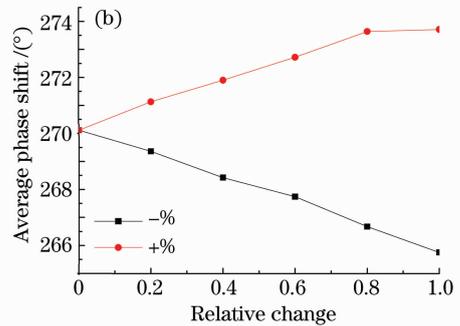
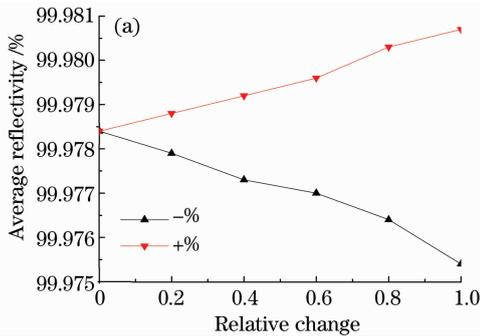


图 5 物理厚度均匀改变对平均反射率(a)与平均相位延迟(b)的影响

Fig. 5 Average reflectivity (a) and phase shift (b) caused by physical thickness change in uniform mode

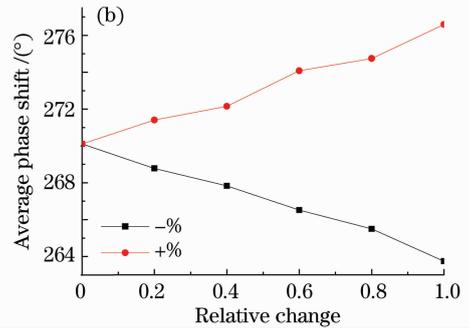
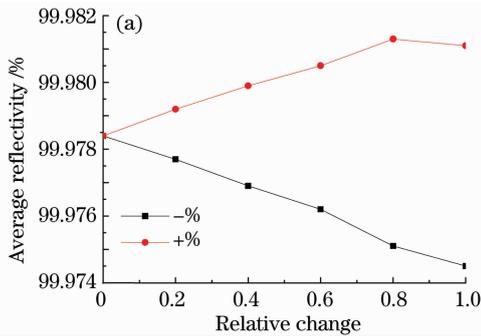


图 6 物理厚度高斯改变对平均反射率(a)与平均相位延迟(b)的影响

Fig. 6 Average reflectivity (a) and phase shift (b) caused by physical thickness change in normal mode

4.2 折射率误差对反射率和相位的影响

图 7 为每种膜料折射率独立随机均匀改变 $-1\% \sim +1\%$, 间隔为 0.2% , 图 7(a), (b) 分别为平均反射率和平均相位延迟随折射率均匀改变造成的

变化,可见,平均反射率偏差和平均相位延迟偏差随着改变幅度变大而增加,其平均反射率为 99.976%~99.980%,平均相位延迟在 265.43°和 274.36°之间。

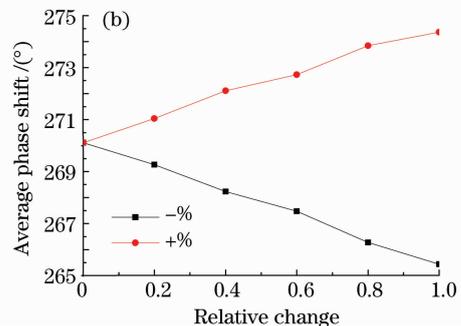
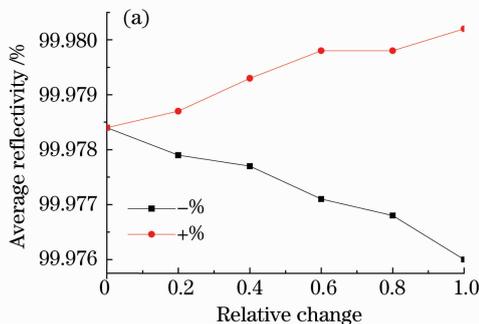


图 7 折射率均匀改变对平均反射率(a)与平均相位延迟(b)的影响

Fig. 7 Average reflectivity (a) and phase shift (b) caused by refractive index change in uniform mode

图 8 为折射率随机独立发生高斯改变 $-1\% \sim +1\%$, 间隔同样是 0.2% 。由图 8 发现,平均反射率偏差和平均相位延迟偏差随着改变幅度增加而变

大,其平均反射率控制在 99.974%~99.981%之间,平均相位延迟控制在 264.37°~277.26°之间。

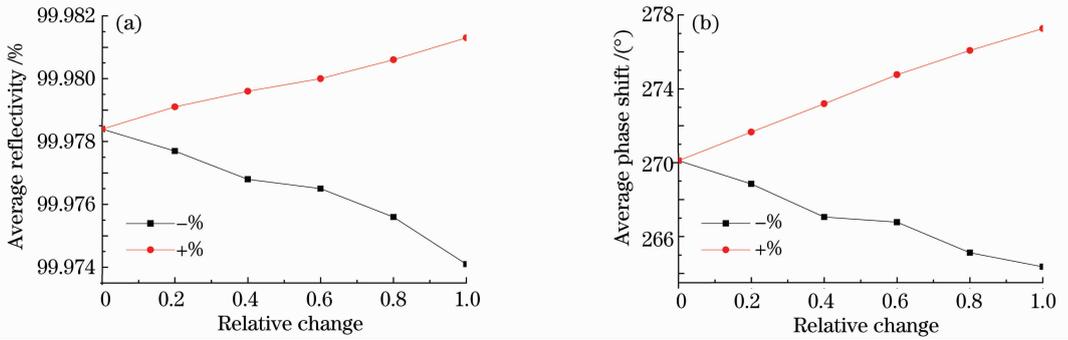


图 8 折射率高斯改变对平均反射率(a)与平均相位延迟(b)的影响

Fig. 8 Average reflectivity (a) and phase shift (b) caused by refractive index change in normal mode

无论是膜厚还是折射率的改变,对平均反射率的影响不明显,可以忽略不计,对于平均相位延迟的影响较敏感。表 1 为物理厚度分别以均匀和高斯方

式改变引起的平均相位延迟偏差,表 2 为折射率分别以均匀和高斯方式改变引起的平均相位延迟偏差。

表 1 物理厚度均匀和高斯改变引起的平均相位延迟偏差

Table 1 Deviation of average phase shift ($\delta\Delta$) caused by thickness change in uniform and normal mode respectively

Relative change /%	± 0	± 0.2	± 0.4	± 0.6	± 0.8	± 1.0
Uniform ($\delta\Delta$) /($^{\circ}$)	0	1.0	1.7	2.6	3.5	4.4
Normal ($\delta\Delta$) /($^{\circ}$)	0	1.3	2.3	3.9	4.6	6.4

表 2 折射率均匀和高斯改变引起的平均相位延迟偏差

Table 2 Deviation of average phase shift ($\delta\Delta$) caused by refractive index change in uniform and normal mode respectively

Relative change /%	± 0	± 0.2	± 0.4	± 0.6	± 0.8	± 1.0
Uniform ($\delta\Delta$) /($^{\circ}$)	0	1.0	2	2.6	3.8	4.6
Normal ($\delta\Delta$) /($^{\circ}$)	0	1.5	3	4.6	5.9	7.2

4.3 单层膜厚改变对反射率和相位的影响

图 9 为单独改变一层膜厚,同时保持其他层膜厚不变,分析光性的变化。此处 Ag 膜上 Al_2O_3 层作为第一层,横坐标代表膜的层数,图 9(a), (b)纵坐标分别代表平均反射率和平均相位延迟,清晰地看到,平均反射率为 99.977%~99.979%,平均相位延迟为

268.76°~271.34°,在膜层 14,19 时引起的平均反射率和平均相位延迟波动较大,这也要求在制备此相位延迟器时,要精确控制该两层膜厚,同时还发现膜层 14 又是调节相位部分增加的 G-T 腔,由 G-T 腔理论也易知该层应该为敏感层。

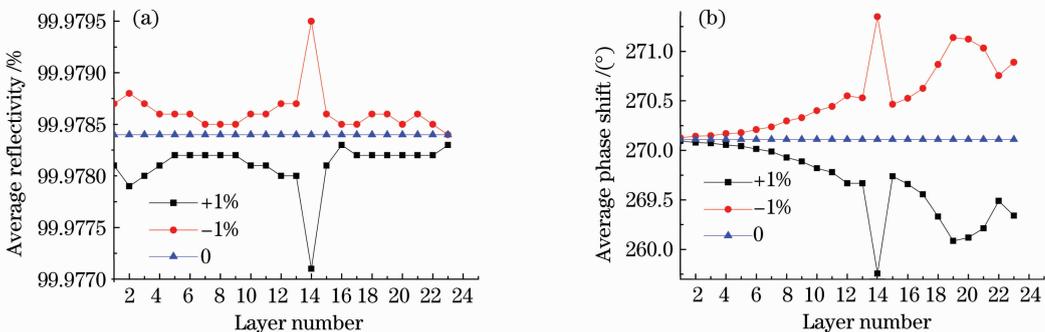


图 9 每层厚度单独改变对平均反射率(a)和平均相位延迟(b)的影响

Fig. 9 Average reflectivity (a) and phase shift (b) caused by the physical thickness change of single layer respectively

4.4 角度容差对反射率和相位的影响

图 10 给出了该设计实例的角度容差分析,为该相位延迟器使用时提供方便。入射角范围为 43°~47°,间隔 0.5°,图 10(a)横坐标为设计波段,从上到

下分别表示入射角从 43°到 47°时反射率的变化,得到了 $R \geq 99.93\%$,图 10(b)从下到上分别表示从 43°~47°时相位延迟的变化,得到了相位延迟偏差 8.5°。从图 10(b)很直观看到随着入射角从 43°逐

渐递增至 47° 时,设计波段上的相位延迟也出现递增的趋势,而且是比较规则的变化,如图 11 所示,平

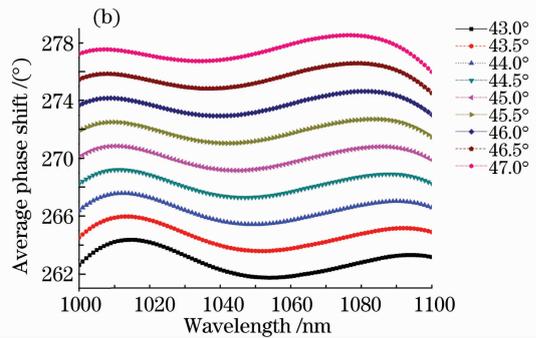
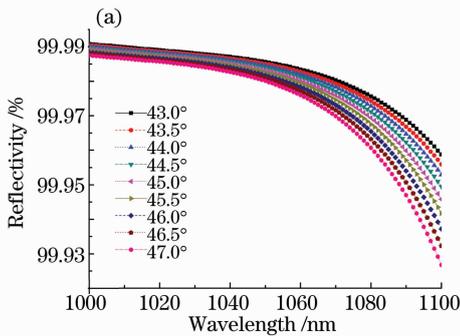


图 10 入射角改变对反射率(a)和相位延迟(b)的影响

Fig. 10 Reflectivity (a) and phase shift (b) caused by incident angles change

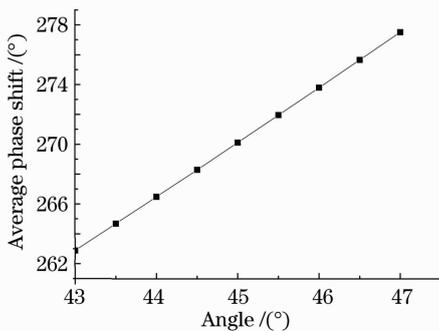


图 11 平均相位随角度的变化

Fig. 11 Average phase shift caused by incident angles change

5 结 论

该设计实例采用金属与介质组合,运用 G-T 腔理论,在入射角 $\theta = 45^\circ$ 处,波长范围 $\Delta\lambda = 1000 \sim 1100$ nm 内,得到 $R \geq 99.945\%$,平均反射率 $\bar{R} = 99.978\%$,相位延迟 $269.2^\circ \leq \Delta \leq 270.8^\circ$,平均相位延迟 $\bar{\Delta} = 270.1^\circ$,同时利用 Al_2O_3 层增强 Ag 与基底以及 Ag 与介质层的粘附性。

详细地分析了物理厚度和折射率分别以均匀和高斯方式改变对光谱性能的影响,无论是膜厚还是折射率发生改变时对平均反射率的影响可以忽略不计,但平均相位延迟对其比较敏感,尤其当两者发生高斯变化时,平均相位延迟偏差较大。

入射角的变化对平均相位延迟的影响呈现线性趋势。对于敏感层的分析,发现膜层 14, 19 是敏感层,对平均相位延迟和平均反射率有比较大的影响,则在相位延迟器制备时需提高这两层膜层制备精度,将容差严格控制在 $\pm 1\%$ 以内。

致谢 本文在范正修老师的悉心指导下完成,在此

均相位延迟随着角度的递增呈线性变化,对实际使用的时候具有比较准确的参考意义。

表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- Huang Jianbing, Wang Yingjian, Deng Zhi *et al.*. Investigation on preparation and performance of phase retarder in chemical oxygen-iodine laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 277~280
- 黄建兵,王英剑,邓志等. 氧碘激光器相位延迟片的制备与性能研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 277~280
- Fang Wang, Jianbing Huang, Yingjian Wang *et al.*. Phase retarder in chemical oxygen-iodine laser at 45° incidence [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 114~115
- Huang Jianbing, Shao Jianda, Wang Yingjian *et al.*. Preparation and performance of phase retarder at the wavelength of 1315 nm [C]. *SPIE*, 2004, **5774**: 357~360
- Wang Jinfeng, Yang Fu. Design of wide-angle reflection-induced phase retarder[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 739~741
- 王晋峰,杨富. 宽角度反射式相位延迟器的设计[J]. *光学技术*, 2005, **31**(5): 739~741
- I. Filinski, T. Skettrup. Achromatic phase retarders constructed from right-angle prisms: design[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(16): 2747~2751
- R. M. A. Azzam, A. Alsamman. Efficiency of linear-to-circular polarization conversion for light reflection at the principal angle by a dielectric-conductor interface[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(4): 834~837
- Konstantin V. Popov, J. A. Dobrowolski, Alexander V. Tikhonravov *et al.*. Broadband high-reflection multilayer coatings at oblique angles of incidence[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2139~2142
- Huang Jianbing, Wang Yingjian, Fang Ming *et al.*. Design of 90° reflection-induced phase retarder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1169~1172
- 黄建兵,王英剑,方明等. 90° 反射式相位延迟器的设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1169~1172
- R. M. A. Azzam, M. M. K. Howlader. Bilayer coatings that produce a 90° differential reflection phase shift at oblique incidence; all possible solutions[J]. *Thin Solid Films*, 1996, **272**(1): 143~147
- W. H. Southwell. Multilayer coating design achieving a broadband 90° phase shift[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(16): 2688~2692
- 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
- 12 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. 24~29
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007. 24~29
- 13 Liao Chunyan, Wu Zubin, Fan Zhengxiu *et al.*. Negative dispersion mirrors in Ta₂O₅/SiO₂ for femtosecond Ti:sapphire lasers by using Gires-Tournois interferometers[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(6): 1443~1445
- 14 Liao Chunyan, Shao Jianda, Fan Zhengxiu. Design of negative dispersion mirrors used for the femtosecond-pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 730~733
廖春艳, 邵建达, 范正修. 飞秒脉冲激光器中色散补偿膜的设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(5): 730~733
- 15 Macleod H. A.. Thin Film Optical Filters[M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001: Chapter 2
- 16 K. Ferencz, R. Szipocs. Recent developments of laser optical coatings in Hungary [J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(10): 2525~2538
- 17 Huang Jianbing. The Investigation on the Optical and Phase Performance of Coatings by Ion-Beam Sputter[D]. Shanghai: Shanghai Insititue of Optics and fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 86~89
黄建兵. 离子束溅射薄膜的光学和位相特性研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2005. 86~89
- 18 G. Hass, J. B. Heaney, H. Herzig *et al.*. Reflectance and durability of Ag mirrors coated with thin layer of Al₂O₃ plus reactively deposited silicon oxide[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(11): 2639~2644
- 19 Deng Yuanlong, Li Yuezhi, Wu Yubin *et al.*. Influence of metal-coated mirrors on measurement accuracy in heterodyne interferometric ellipsometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 439~443
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): 439~443
- 20 Xiao Xiudi, Dong Guoping, Deng Songwen *et al.*. Effects of heat treatment on TiO₂ sculptured thin film birefringence prepared by electron beam deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2166~2170
肖秀娣, 董国平, 邓沁文 等. 热处理对电子束蒸发 TiO₂ 雕塑薄膜双折射性能的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(8): 2166~2170
- 21 Miao Jie, Lin Qiang, Zhang Yanli *et al.*. Four-zone method to eliminate influence of polarizing prisms imperfections on measurement of phase retardation of wave plates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1938~1941
缪 洁, 林 强, 张艳丽 等. 四区域法消除偏振棱镜缺陷对薄片相位延迟测量的影响[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1938~1941