

文章编号: 0253-2239(2007)10-1896-5

光学介质薄膜优化的宽带消色差 $\lambda/4$ 相位延迟器

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: 根据全反射相变理论设计了菲涅耳菱体型相位延迟器延迟量对入射角变化不敏感的结构角。根据薄膜的偏振效应,从薄膜的特征矩阵出发,通过在菱体的两个全反射面蒸镀光学介质膜的方法拓宽了菲涅耳菱体型相位延迟的消色差宽度。在 ML_EB900 型镀膜机上适当控制沉积条件制备了消色差相位延迟膜,实验测试结果表明:在 530~700 nm 的波长范围内,可以获得 90° 的相位延迟量,且最大偏差小于 0.7° 。

关键词: 薄膜光学; 延迟器; 消色差; 相移

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

Thin-Film-Optimized Broadband Achromatic Quarter-Wave Phase Retarder

Yan Bin Wu Fuquan Hao Dianzhong Zhang Xu Bi Jia Zheng Mengmeng

(Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu 273165)

Abstract: Based on the total-reflection phase transformation theory, the Fresnel rhomb retarder is obtained with a structure angle with which the phase retardation is insensitive to the angle of incidence. According to thin film polarization effect and eigenmatrix, the Fresnel retarder's achromatic width is expanded by evaporating dielectric membrane in two total-reflection surfaces of the rhomb. Using the ML_EB900 film coating machine, the rhomb achromatic phase delay membrane is fabricated with appropriate deposition condition. The experimental result indicated, in 530~700 nm wavelength ranges, 90° phase retardation and maximum deviation within 0.7° were obtained.

Key words: thin-film optics; retarder; achromatic; phase shift

1 引 言

传统的相位延迟器是利用晶体的双折射特性制成的,这种器件的延迟量与光波长具有严格的对应关系,限制了它的适用范围。消色差相位延迟器大大削弱了延迟量对波长的依赖关系,可以用于较大的光谱范围,它在现代光学技术中起着重要的作用。近年来,人们发现通过在器件表面镀膜的方法,可以改善器件的延迟量和延迟精度,并且薄膜相位延迟器的适用范围从可见光区域延伸到了紫外和红外波段^[1~3]。本文在常规菲涅耳菱体的设计基础上,利用给定的基底材料,通过器件相位延迟量同全反射角之间的关系

并通过在菱体全反射表面镀介质膜的方法,设计了一种宽带消色差相位延迟器,实验测试结果表明这种消色差相位延迟器具有很高的实用价值。

2 理论分析

2.1 菱体中的相位延迟

常规的菲涅耳菱体是一个平行六面体,光线在菱体内的传播情况如图 1 所示。当光线垂直于入射端面时,光线在菲涅耳菱体两个全反射面的入射角 θ 等于菱体的结构角 α 。假设光线发生全反射时的全反射角为 θ , n 为菱体的折射率,光线在菱体上经

作者简介: 闫 斌(1980—),男,山东省济宁市,硕士研究生,主要从事偏振光学与薄膜光学等方面的研究。

E-mail: yanbin2100@163.com

吴福全(1952—),男,山东郓城人,教授,主要从事偏振光学与薄膜光学方面的教学及科研工作。

E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2007-01-03; 收到修改稿日期: 2007-04-24

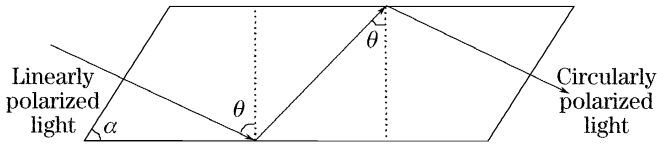


图 1 光线在非涅耳菱体内的传播

Fig. 1 Beam path in Fresnel rhomb

过两次全内反射产生的总相位延迟量为 δ 。入射线偏振光经过全反射后，两个分量受到不同的相位跃变，p 光、s 光的相位延迟量可以分别记为^[4]

$$\tan\left(\frac{\delta_p}{2}\right) = \frac{n \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{\cos \theta}, \quad (1)$$

$$\tan\left(\frac{\delta_s}{2}\right) = \frac{\sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}}{n \cos \theta}, \quad (2)$$

那么 p 光、s 光相对的相位差 δ 为

$$\delta = 2 \arctan\left(\frac{\cos \theta \sqrt{\sin^2 \theta - n^2}}{\sin^2 \theta}\right), \quad (3)$$

从(3)式可以看出，相位延迟量 δ 是全反射角 θ 和基底折射率 n 的函数。对上式进行微分处理，可得到相位延迟量 δ 随全反射角 θ 的变化梯度：

$$S_\theta = \frac{\partial \delta}{\partial \theta} = \frac{2n \sin \theta (\cos^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 1)}{(n^2 \sin^2 \theta - \cos^2 \theta)(n^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2}}, \quad (4)$$

对于给定的材料(n 一定)，当 S_θ 为零时，即

$$\cos^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 1 = 0 \quad (5)$$

时，入射光线通过菲涅耳菱体后，入射角的变化对相位延迟量产生的影响最小。

2.2 薄膜中的相位延迟

光学薄膜在倾斜使用时，p 分量和 s 分量发生分裂，一般情况下光学薄膜对两偏振分量的反射率 R_s 和 R_p 、透射率 T_s 和 T_p 以及相移 δ_s 和 δ_p 都是不同的，透射光或反射光的偏振状态会发生改变，此即为薄膜的偏振效应。

当一束平面偏振光在介于两种具有不同折射率的各向同性均匀介质之间的界面上发生反射时，反射光中 p 分量和 s 分量的反射系数由菲涅耳公式给出^[5]：

$$\begin{cases} r_p = \frac{n_2 \cos \alpha_1 - n_1 \cos \alpha_2}{n_2 \cos \alpha_1 + n_1 \cos \alpha_2}, \\ r_s = \frac{n_1 \cos \alpha_1 - n_2 \cos \alpha_2}{n_1 \cos \alpha_1 + n_2 \cos \alpha_2}, \end{cases} \quad (6)$$

(6)式中角标 1、2 分别代表入射介质和透射介质中的参量；角标 p 和 s 分别代表偏振光的平行分量和垂直分量， n 为介质的折射率， α 为入射角或者折射角， r 为反射系数。若光线由折射率为 n_0 的入射介质以入射角 α_0 射到折射率为 n 的透射介质中，折射角 α 可由斯涅耳定律得

$$n_0 \sin \alpha_0 = n \sin \alpha, \quad (7)$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - (n_0/n)^2 \sin^2 \alpha_0}. \quad (8)$$

假定玻璃和膜料均为无吸收介质，空气、薄膜和玻璃的折射率分别为 n_a 、 n_f 和 n_g ，光线在空气、薄膜和玻璃中的传播角度分别为 α_a 、 α_f 和 α_g 。

当一束单色线偏振光自菱体内射向玻璃和薄膜的界面时，反射光中 p、s 分量的反射系数为

$$r_i = \frac{r_t + r_b \exp(-2i\beta)}{1 - r_t r_b \exp(-2i\beta)}, \quad (9)$$

式中 r_t 和 r_b 分别是由(6)式导出的反射系数，其中 β 的取值由下式来确定：

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n d \cos \alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} d \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \alpha_0}, \quad (10)$$

反射光中 p、s 分量间的相位延迟， δ 为

$$\delta = \delta_p - \delta_s = \arg(r_p/r_s), \quad (11)$$

式中 r_p 和 r_s 分别代表 p、s 分量的反射系数。

对于多层膜组成的膜系，我们可以用矩阵方法来计算，每个单层膜分别记为一个矩阵，单层膜的特征矩阵设为^[6]

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos \theta_j$ ，对于 s 波， $\eta_{sj} = N_j \cos \theta_j$ ，对于 p 波， $\eta_{pj} = N_j / \cos \theta_j$ ，对于 k 层膜，膜系的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k=1} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

多层膜与基片的组合导纳为 $Y = C/B$ ，则

$$\begin{cases} r_p = \frac{\eta_0 B_p - C_p}{\eta_0 B_p + C_p}, \\ \delta_p = \arctan \left[\frac{i \eta_0 (C_p B_p^* - B_p C_p^*)}{\eta_0^2 B_p B_p^* - C_p C_p^*} \right], \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} r_s = \frac{\eta_0 B_s - C_s}{\eta_0 B_s + C_s}, \\ \delta_s = \arctan \left[\frac{i \eta_0 (C_s B_s^* - B_s C_s^*)}{\eta_0^2 B_s B_s^* - C_s C_s^*} \right], \end{cases} \quad (15)$$

则膜的 p、s 分量的相位差为

$$\delta = \arg(r_p/r_s) = \delta_s - \delta_p. \quad (16)$$

3 设计实例与样品镀制

3.1 膜系设计

选用在可见光范围内平均折射率约为 1.65 的 Lak₂ 玻璃为基底，将玻璃的折射率代入(5)式，可以

得到延迟量对入射角变化最不敏感的菱体的结构角 θ 为 47.75° 。把菱体结构角与相对折射率带入(3)式可以得到入射光线在菲涅耳菱体内发生一次全内反射产生的相位延迟量为 55.09° ，两次为 110.18° 。实际上需要的是 90° 相位延迟器，对于这一差异，可以通过镀膜的方法来改变延迟量，以得到所需要的 $\lambda/4$ 相位延迟器^[7~9]。

要得到 $\lambda/4$ 的相位延迟器，可以使一个镀膜全反射面在中心波长处产生 δ 的相位延迟，另一个镀膜全反射面在中心波长处产生 $90^\circ - \delta$ 的相位延迟即可。通过数值模拟软件，对菱体的两个全反射面分别进行膜层优化设计。首先使得光线通过一个镀膜全内反射面产生 0° 左右的相位延迟，设计膜系结构为 $G/g_1(3a\ 1)^{A1}/Air$ ，监控波长为 533 nm ，得到的设计曲线如图 2 所示；另外一个镀膜全内反射面产生的相位延迟量为 90° 左右，设计膜系结构为 $G/g_1(m)^{A4}\ g_2(ml)^{A2}\ g_3(l)^{A1}/Air$ ，监控波长为 660 nm ，设计曲线如图 3 中 a 曲线所示。采用的镀膜材料是普通的 MgO ， TiO_2 ， SiO_2 和 Al_2O_3 。其中 g_1 、 g_2 、 g_3 代表的是周期膜层前的系数， h 代表高折射率膜料 TiO_2 ， l 代表低折射率膜料 SiO_2 ， m 和 a 分别代表中间折射率膜料 MgO 和 Al_2O_3 。

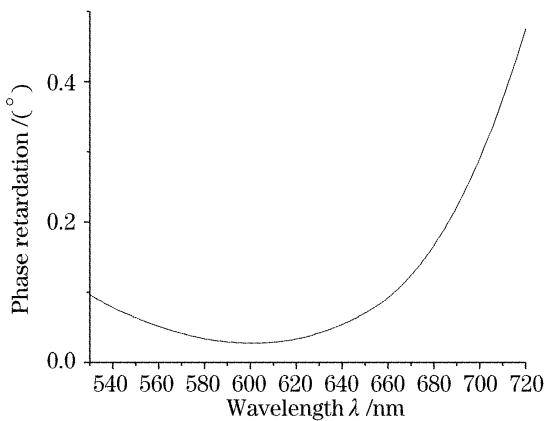


图 2 0° 相位延迟全反射面的延迟量的特性
Fig. 2 Phase retardation of total-reflection surface for 0° phase shift

入射光线在菱体内部经过两次全内反射后产生的总相位延迟量随波长的变化如图 3 中 b 曲线所示。从图 2 和图 3 可以看出采用上述设计方法，利用薄膜在两个全内反射面产生的相位延迟量与 0° 和 90° 延迟量之差变化的互补性，可以有效减少总相位延迟量的偏差；其中 $560\sim 640\text{ nm}$ 这一波段范围内，消色差性更佳。光线在菱体内部的反射率随波长的变化关系如图 4 所示，从图 4 可以看出在研究的波长范围内 ($530\sim 700\text{ nm}$)，光线完全满足全反射条件。

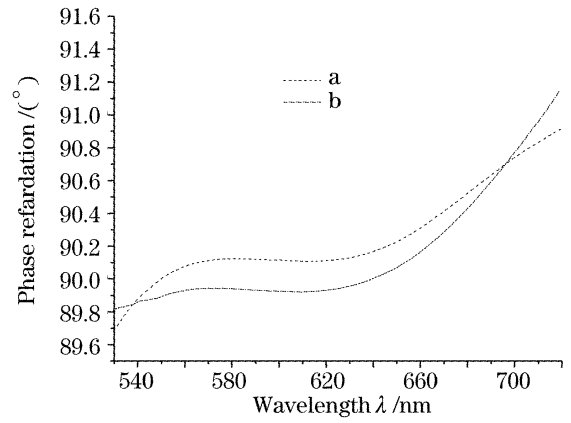


图 3 90° 相位延迟全反射面延迟量(a)及总延迟量(b)的特性
Fig. 3 Phase retardation of total-reflection surface (a) and total phase retardation (b) for 90° phase shift

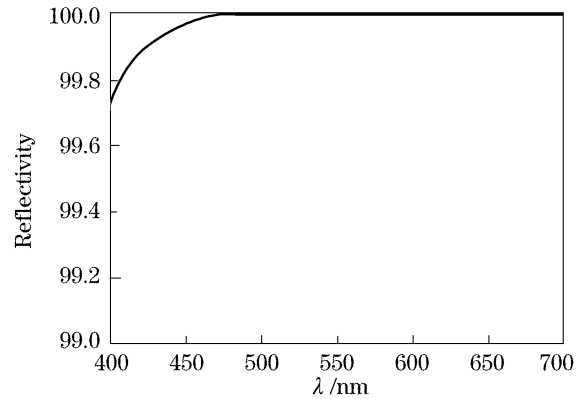


图 4 设计的反射率随波长的关系
Fig. 4 Reflectivity of designed sample versus wavelength
3. 2 样品镀制

样品的镀制是在 Alpha_plus, ML_EB900 型镀膜机上进行的，该设备具有离子源辅助蒸镀功能，以增加成膜的致密性，用美国 INFICON 公司的 IC/5 deposition controller 控制蒸发速率，保证蒸发速率的一致性。用气体流量计控制高纯氧(99.99%)的流量，保证真空度的相对稳定。镀膜过程中控制实验条件如表 1 所示。

表 1 实验中的控制条件

Table 1 Control condition in experiment

Sample	Pressure / 10^{-3} Pa	Speed / (nm/s)	O_2 flux / (cm^3/s)
MgO	6.7	0.5	20
Al_2O_3	6.0	0.5	20
TiO_2	5.1	0.3	40
SiO_2	4.7	0.5	20

4 实验测试与分析

4. 1 实验测试

采用相位延迟量的归一化测量法^[10]，用波长 633 nm 的氦氖激光器、波长 532 nm 和 670 nm 的半

导体激光器对样品的相位延迟量进行了测量,由于相位延迟量会随温度的变化而发生变化,在测试过程中控制室温为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试结果如表 2 所示。

表 2 相位延迟量设计和测量值的比较

Table 2 Phase retardation comparison of theoretical and measured value

	532 /nm	633 /nm	670 /nm
Theoretical value /($^{\circ}$)	89.824	89.969	90.287
Measured value /($^{\circ}$)	89.873	89.965	90.278
	89.835	89.972	90.296
	89.915	89.974	90.288

通过表 2 理论值和测量值的对比可以看出:在 $530\sim 700\text{ nm}$ 约 170 nm 的波长范围内,器件的相位延迟量在 90.679° 和 89.818° 之间变化;其实测值与设计值吻合的很好。

4.2 光学厚度误差对相位延迟量的影响

图 5 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的膜层光学厚度变化而其它层是不变的。上面的两条曲线代表每点处的光学厚度变化 $+1\%$,下面的两条曲线代表每点的光学厚度变化 -1% 。从图 5 可以看出,无论是对于 0° 膜系还是对于 90° 膜系,最外层厚度变化对相移的影响是最大的。此外,对于 90° 的膜系来讲,最外层光学厚度变化对相位延迟误差的影响在 $3^{\circ}\sim 4.5^{\circ}$ 的范围内,而其它层相比较要低的多。

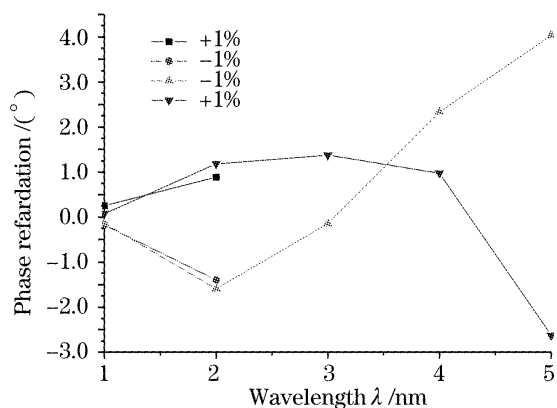


图 5 单层膜光学厚度变化 1% 对相位延迟量的影响

Fig. 5 Phase retardation variation where a single layer optical thickness varies by 1%

4.3 入射角的误差对相位的影响

图 6 中的横坐标代表波长范围,纵坐标代表相移。图中的曲线从上向下分别代表入射角从 49.75° 到 45.75° 之间变化,间隔为 1° 。由于在菱体设计中,我们取了相位延迟量对入射角变化最不敏感的结构角,图 6 中的曲线明显符合这个设计。当入射

角的变化范围在的 2° 范围内时,相位延迟量的最大偏差不超过 0.2° ,其中 $530\sim 640\text{ nm}$ 这一波段范围内,相位延迟量对入射角的不敏感性更佳。

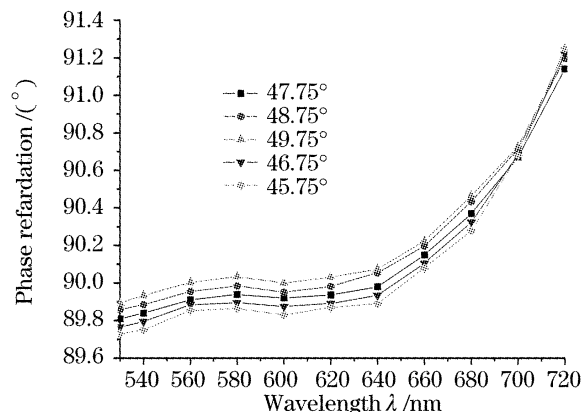


图 6 入射角变化对相位延迟量的影响

Fig. 6 Effect of the incident angle change on the phase retardation

5 结 论

在理论分析的基础上,从结构角的选取出发,通过在菱体的两个全内反射面镀光学介质膜的方法设计了一种新型的薄膜相位延迟器。采用一个 0° 相位延迟全反射面与一个 90° 相位延迟全反射面结合的方法,有效减少了总相位延迟量的偏差。对器件的测试结果表明:在 170 nm 左右的带宽范围内,相位延迟量的最大偏差小于 0.7° ,测试结果与理论值相吻合。

参 考 文 献

- Huang Jianbing, Zhang Dawei, Zhang Dongping *et al.*. Investigation on properties of reflection phase retarder[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(6): 761~764 (in Chinese)
黄建兵,张大伟,张东平等. 反射式相位延迟器的性能研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 761~764
- W. H. Southwell. Multiplayer coatings producing phase change [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(11): 1875~1878
- Huang Jianbing, Wang Yingjian, Tang Ming *et al.*. Design of 90° reflection-induced phaseretarder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 1169~1173 (in Chinese)
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**(6): 1169~1173
- Max Born, Emil Wolt. *Principles of Optics* [M]. transl. Yang Jiasun *et al.*, Beijing: Science Press, 1978. 74~77 (in Chinese)
M. 玻恩, E. 沃耳夫. *光学原理* [M]. 杨葭孙等译,北京:科学出版社, 1978. 74~77
- Eberhard Spiller. Totally reflecting thin-film phase retarders[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(20/15): 3544~3549
- Z. P. Wang, W. M. Sun, S. L. Ruan *et al.*. Polarization-preserving totally reflecting prisms with a single medium layer [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13): 2802~2806
- Wang Xia, Wei Yuhua, Wu Fuquan. Optimized oblique incidence achromatic phase retarder[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(6): 409~411 (in Chinese)

- 王霞,魏玉花,吴福全. 斜入射消色差相位延迟器的优化设计[J]. 激光技术, 2001, **25**(6): 409~411
- 8 Lin Yongchang, Lu Weiqiang. *Optics Thin-Film Principle* [M]. Beijing: National Defence Industry University Press, 1990 (in Chinese)
林永昌,卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业大学出版社, 1990
- 9 Tang Jinfa, Zheng Quan. *Applied Thin-Film Optics* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984. 171~175 (in Chinese)
唐晋发,郑权. 应用薄膜光学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 171~175
- 10 Zhao Qiuling, Wu Fuquan. Optical phase retardation measurement by normalized polarizing modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 360~363 (in Chinese)
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): 360~363

征 订 启 事

第八届全国激光加工学术论文集——《中国激光》2007年增刊,已于2007年3月出版。论文集较全面地反映了近年来我国激光加工技术研究、应用和产业化的最新成果,包括激光连接(焊接、钎焊),激光去除(切割、打孔、清洗、抛光等),激光强化(合金化、熔覆、沉积等),激光制备新材料,激光快速成形与激光快速制造,激光复合加工技术,激光微纳米技术,激光加工新技术与新应用,激光加工过程检测与控制,新型激光器件与光加工系统等领域,作者来自于国内近40个大专院校、科研机构和企业。是广大激光加工领域工作者的非常有价值的参考资料。

论文集约400页,定价100元,进口雅光纸精印,光盘版定价80元,欢迎读者订阅。

联系人:高先生 电 话:021-69918253