

# 1064 nm 分振幅光偏振测量仪的 多层介质分束镜的设计和制备

袁文佳, 沈伟东, 章岳光, 郑晓雯, 沐 雯, 方 波, 杨陈楹, 刘 旭

浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 设计和制备了一种用于 1064 nm 分振幅光偏振测量仪(DOAP)的具有多层介质薄膜结构的差分相移分束镜。通过理论分析该 DOAP 系统的仪器矩阵参数,得到分束镜的最优参数,并用离子束溅射沉积方法制备了分束镜样品及其背面的减反射膜,其实测结果与设计值吻合较好。与单层薄膜分束镜相比,多层介质薄膜分束镜不受基板、膜层材料,以及入射角和工作波长的限制,具有更广泛的应用。

**关键词** 薄膜;分束镜;相位延迟;偏振测量;多层介质膜

**中图分类号** O484.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0531001

## Design and Preparation of Multilayer Dielectric Beam Splitter for Division-of-Amplitude Photopolarimeter at 1064 nm

Yuan Wenjia, Shen Weidong, Zhang Yueguang, Zheng Xiaowen,  
Mu Wen, Fang Bo, Yang Chenying, Liu Xu

*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*

**Abstract** A differential phase shift beam splitter with a multi-layer dielectric film structure which is used for a division-of-amplitude photopolarimeter (DOAP) with an operating wavelength of 1064 nm is designed and prepared. The optimal parameters of beam splitter are obtained by analyzing instrument matrix parameters of the DOAP system. The beam splitter sample and its anti-reflection coating on the backside are prepared with the ion beam sputtering (IBS) deposition method. The experimental results are well consistent with the designed value. Comparing with single-layer film beam splitters, this multilayer dielectric film beam splitters possess a wider application, which is not limited by the substrate, layer materials, incident angle, and operating wavelength.

**Key words** thin films; beam splitter; phase delay; polarimetry; multilayer dielectric film

**OCIS codes** 310.6860; 230.1360; 050.5080; 120.5410; 310.4165

## 1 引 言

光偏振测量术已经广泛应用于材料、电子、生物和医药等领域。斯托克斯参数可以描述光的强度和偏振态,因此可以通过对斯托克斯参数的测量来确定光的偏振态。传统的测量方法是使入射光经过起偏器、相位延迟器等光学偏振元件,通过机械转动或周期性调制来改变光学元件的偏振状态,测出一组光强值,从而得到 4 个斯托克斯参数<sup>[1-6]</sup>。但是,当需要测量的光偏振态变化非常快时,上述测量方法就不再适用了。

Azzam<sup>[7]</sup>发明了一种分振幅光偏振测量仪(DOAP),其利用振幅分割原理测量斯托克斯参数。DOAP 没有使用转动部件或调制器,能够快速且同时测量出描述待测光偏振态的全部斯托克斯参数。在典型的

**收稿日期:** 2016-12-28; **收到修改稿日期:** 2017-01-19

**基金项目:** 国家自然科学基金(61275161)、国家 863(2015AA015904)、浙江省自然科学基金(LY13F050001)、中国博士后科学基金资助项目(2016M601936)、博士后创新人才支持计划(BX201600135)

**作者简介:** 袁文佳(1986—),男,博士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: ywjzju@zju.edu.cn

**导师简介:** 沈伟东(1977—),男,博士,教授,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: adongszju@hotmail.com  
(通信联系人)

DOAP 中,分束镜不仅作为分光元件,而且为反射光和透射光分别提供不同的相位延迟,省去了相位延迟片,提高了系统的集成度,因此其也是决定 DOAP 系统性能的关键部件之一<sup>[8-9]</sup>。Azzam<sup>[10]</sup>提出了用于分束镜设计的最优参数,并在后续工作中给出了设计方案,如在高折射率基板上制备单层薄膜的分束镜<sup>[11]</sup>。但是,这种分束镜很难与最优参数匹配,因而 DOAP 测试系统的性能受到影响;同时,受入射角以及基板和膜层材料的限制,该分束镜应用范围有限。

本文设计了一种多层介质膜结构的差分相移分束镜,采用离子束溅射沉积方法制备样品,系统的仪器矩阵行列式归一化值为 0.978,实验结果与设计值吻合较好。

## 2 理论分析

斯托克斯参数可以用来描述光的全部偏振态,即

$$\begin{cases} \mathbf{S} = [S_0 & S_1 & S_2 & S_3]^T \\ S_0 = I_x + I_y \\ S_1 = I_x - I_y \\ S_2 = I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ S_3 = I_R - I_L \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{S}$  为斯托克斯矢量<sup>[12]</sup>,  $S_0$  为入射光波的总光强,  $S_1$  表示  $x$  方向的偏振分量 ( $I_x$ ) 与  $y$  方向偏振分量 ( $I_y$ ) 的光强差,  $S_2$  表示  $+45^\circ$  偏振分量 ( $I_{+45^\circ}$ ) 与  $-45^\circ$  偏振分量 ( $I_{-45^\circ}$ ) 的光强差,  $S_3$  表示右旋与左旋偏振分量 ( $I_R, I_L$ ) 的光强差。

图 1 所示为 DOAP 的原理图<sup>[7]</sup>,利用偏振分束镜将待测入射光分为透射光和反射光,再由棱镜 WP1 和 WP2 分别将反射光和透射光分割为正交的两束偏振光,然后由光电探测器  $D_1, D_2, D_3, D_4$  探测得到这 4 束光的光强分别为  $i_1, i_2, i_3, i_4$ ,并用矢量  $\mathbf{I} = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4]^T$  表示,则

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}\mathbf{S}, \quad (2)$$

式中  $\mathbf{A}$  为系统的仪器矩阵,由分光镜的反射矩阵和透射矩阵、棱镜 WP1 和 WP2 的方位角、以及各探测器的光电转换系数共同决定,通常需要标定<sup>[13-15]</sup>。当  $\det \mathbf{A} \neq 0$  时,  $\mathbf{S} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{I}$ 。

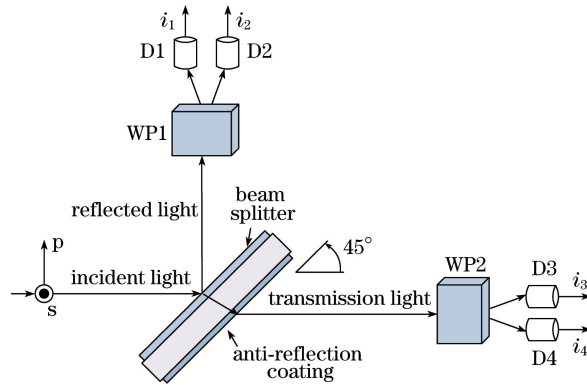


图 1 DOAP 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DOAP

由(2)式可以看出,仪器矩阵的行列式越大,系统的测量精度越高。不考虑光电转换系数的影响,系统的仪器矩阵的行列式为<sup>[10]</sup>

$$\det \mathbf{A} = (RT)^2 \sin(2\psi_r) \sin(2\psi_t) [\cos(2\psi_r) - \cos(2\psi_t)] \sin(\Delta_r - \Delta_t), \quad (3)$$

式中  $R$  和  $T$  分别为分束镜的反射率和透射率;  $(\psi_r, \Delta_r)$  和  $(\psi_t, \Delta_t)$  分别为反射和透射条件下的椭圆参数,  $\Delta_r, \Delta_t$  分别为反射光和透射光的相位延迟 ( $p$  光和  $s$  光之间的相位差),  $\psi$  与  $p$  光和  $s$  光的透射率或反射率相关:

$$\tan^2 \psi_t = T_p / T_s, \quad \tan^2 \psi_r = R_p / R_s, \quad (4)$$

式中  $T_p, R_p$  分别为  $p$  光的透射率和反射率,  $T_s, R_s$  分别为  $s$  光的透射率和反射率。

### 3 分束镜设计

分束镜的特性决定了仪器矩阵  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{A}$  的行列式为最大值时系统的测量精度最高<sup>[8]</sup>, 由(3)式可知, 矩阵  $\mathbf{A}$  的行列式最大值  $|\det \mathbf{A}|_{\max} = \sqrt{3}/36 = 0.0481$ , 此时有

$$\begin{cases} R = T = 0.5 \\ \Delta_r - \Delta_t = \pm \pi/2 \\ (\psi_r, \psi_t) = (27.4^\circ, 62.6^\circ) \text{ or } (\psi_r, \psi_t) = (62.6^\circ, 27.4^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

在倾斜入射情况下, 通常 p 光的透射率要大于 s 光的, 因此  $(\psi_r, \psi_t) = (27.4^\circ, 62.6^\circ)$ , 由(4)式可知, s 光与 p 光的透射率比值

$$T_s/T_p = 0.268. \quad (6)$$

若忽略膜层材料的吸收, 可得  $T_s = 21.12\%$ ,  $T_p = 78.88\%$ 。

为了评价分束镜参数的匹配程度, 定义矩阵  $\mathbf{A}$  的行列式的归一化参数为  $|\det \mathbf{A}|_{\text{norm}} = \det \mathbf{A} / |\det \mathbf{A}|_{\max}$ , 其值越接近 1, 则分束镜的参数和理想设计值越匹配。

同时, 需在基板背面加上减反射膜, 以减小基板背面的反射和光束透过基板后带来的相位延迟。分束镜结构如图 1 所示, 入射角为  $45^\circ$ , 在基板上表面为分束镜(靠近入射光一侧), 下表面为减反射膜。

采用 OptiLayer 软件对分束镜的膜系进行设计和分析。由前文可知, 分束镜的 s 光透射率  $T_s$  的理论设计值为  $21.12\%$ , p 光透射率  $T_p$  的理论设计值为  $78.88\%$ , 反射和透射的差分相移  $(\Delta_r - \Delta_t) = \pi/2$ 。为了方便优化和计算, 直接把  $\Delta_{r,t} = \Delta_r - \Delta_t$  作为目标值进行优化, 而不需要考虑  $\Delta_r$  和  $\Delta_t$  的具体值。这样以  $T_s$ 、 $T_p$  和  $\Delta_{r,t}$  作为优化目标值, 可建立优化的评价函数:

$$F = \left\{ \frac{1}{M} \sum_{p,s} \sum_{m=1}^M \left[ \frac{T(\lambda_m) - T^{(m)}}{\delta T^{(m)}} \right]^2 + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \frac{\Delta_{r,t}(\lambda_m) - \Delta_{r,t}^{(m)}}{\delta \Delta_{r,t}^{(m)}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, M, \quad (7)$$

式中  $\lambda_m$  为优化目标的波长。  $T(\lambda_m)$  为波长  $\lambda_m$  处的 p 光或 s 光的透射率理论设计值,  $\Delta_{r,t}(\lambda_m)$  为波长  $\lambda_m$  处的反射光和透射光的差分相移理论值,  $M$  为优化目标的个数。  $T^{(m)}$  和  $\Delta_{r,t}^{(m)}$  为相应的理论设计值,  $\delta T^{(m)}$  和  $\delta \Delta_{r,t}^{(m)}$  为相应的容差值。

分束镜的初始膜系为  $\text{Sub}/0.88(\text{HL})^5/1.32(\text{HL})^5/\text{Air}$ , 其中 Sub 代表基板, 即为 BK7 玻璃。以空气为入射介质, 基板为出射介质。H 和 L 分别为高、低折射率材料, 参考波长为  $1064 \text{ nm}$ 。高、低折射率材料分别为  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$ , 其不同波长下的光学常数见表 1。在波长  $1064 \text{ nm}$  处,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  的折射率为 2.20,  $\text{SiO}_2$  的折射率为 1.48,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  的消光系数为  $1 \times 10^{-4}$ , 因而可以忽略薄膜的吸收。

表 1  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2$  的光学常数

Table 1 Optical constants of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  and  $\text{SiO}_2$

Wavelength $\lambda$ /nm	600	700	800	900	1000	1100	1200
Optical constants of $\text{Nb}_2\text{O}_5$	2.279	2.249	2.229	2.217	2.208	2.201	2.196
Optical constants of $\text{SiO}_2$	1.486	1.485	1.484	1.483	1.483	1.482	1.482

采用 OptiLayer 软件中的 Needle 优化方法对膜系进行优化, 设计的分束镜膜系结构及其光学特性如图 2 所示。膜系共有 27 层, 总厚度为  $3.9 \mu\text{m}$ , 其中最薄层厚度为  $73 \text{ nm}$ 。波长  $1064 \text{ nm}$  处的透射率为  $49.99\%$ , p 偏振光透射率为  $79.04\%$ , s 光透射率为  $20.95\%$ 。在透射和反射条件下, 椭圆参数的设计值  $(\psi_r, \psi_t) = (27.2^\circ, 62.8^\circ)$ ,  $(\Delta_r, \Delta_t) = (141.7^\circ, 51.7^\circ)$ 。  $1064 \text{ nm}$  处膜系设计值与理想设计值十分接近, 且在  $\pm 20 \text{ nm}$  的带宽内两者能较好匹配。

减反射膜的设计要求是在  $45^\circ$  入射条件下, 反射率尽可能小, 同时尽可能降低光经过分束镜背面后的透射相位延迟。减反射膜设计结果如图 3 所示。膜系共有 10 层, 总厚度为  $1.2 \mu\text{m}$ 。在波长  $1064 \text{ nm}$  处, p 光和 s 光的反射率均低于  $0.5\%$ , 透射相位延迟接近于 0。

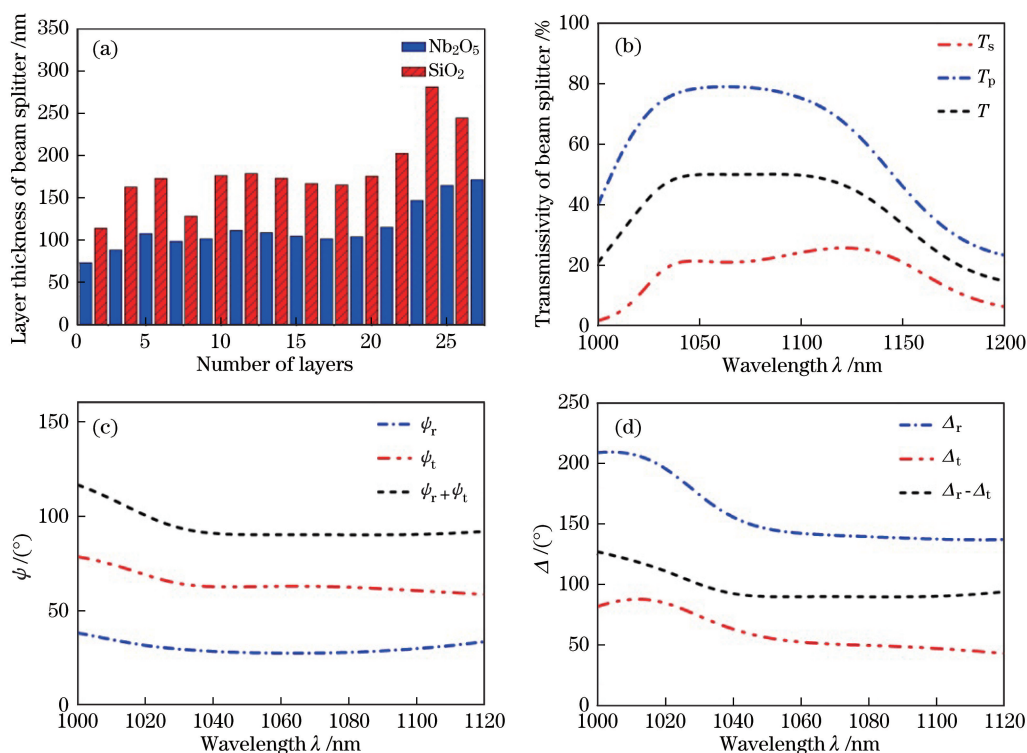


图 2 所设计分束镜的膜系结构和光学特性。(a) 膜系结构;(b) 透射率;(c)  $\psi$ ;(d)  $\Delta$

Fig. 2 Film structure and optical characteristics of designed beam splitter.

(a) Film structure; (b) transmissivity; (c)  $\psi$ ; (d)  $\Delta$

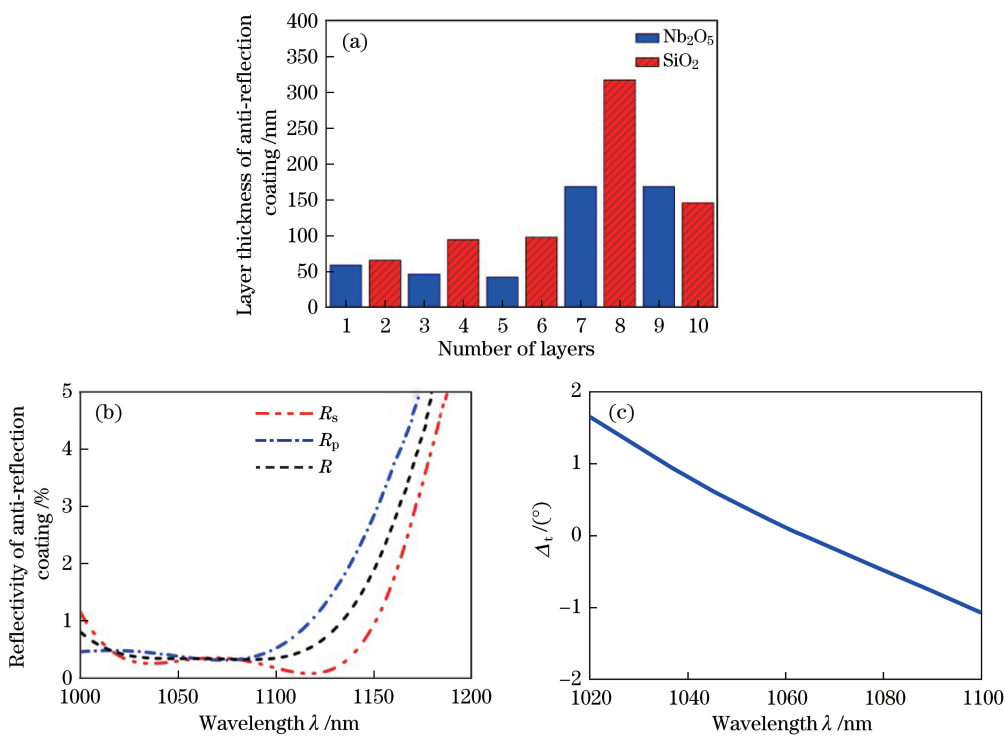


图 3 所设计减反膜的膜系结构和光学特性。(a) 膜系结构;(b) 反射率;(c)  $\Delta_r$

Fig. 3 Film structure and optical characteristics of designed anti-reflection coating.

(a) Film structure; (b) reflectivity; (c)  $\Delta_r$

## 4 实验结果与分析

离子束溅射是一种制备高性能光学薄膜的沉积方法,离子束溅射系统由美国 Veeco 公司生产的两个口径分别为 16 cm 和 12 cm 的射频离子源组成,其中口径为 16 cm 的为主(溅射)离子源,12 cm 的为辅助离子源。制备过程中系统充入一定量的氩气和氧气,真空室的背景气压为  $2 \times 10^{-4}$  Pa,工作气压为  $5 \times 10^{-2}$  Pa。采用石英晶振监控薄膜沉积时的厚度。薄膜沉积的工艺参数见表 2。

表 2 离子束溅射沉积工艺参数

Table 2 Process parameters of ion beam sputtering deposition

Sputtering ion source			Assisted ion source			Pressure /Pa	
Beam current /mA	Beam voltage /V	Gas flow /(mL/min)	Beam current /mA	Beam voltage /V	Gas flow /(mL/min)	Background	Working
400	1000	16(Ar)	150	200	6(Ar)+18(O <sub>2</sub> )	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-2}$

样品的入射光角度为  $45^\circ$ ,其透射率曲线通过 Agilent 公司的 Cary 7000 分光光度计测试获得,如图 4(a)所示。从图中可知,在波长 1064 nm 处,样品的透射率为 46.97%,p 光透射率为 76.23%,s 光透射率为 17.71%。受制备过程中膜层厚度偏差的影响,实际测试值较理论值略偏低。

图 4(b)为减反射膜的反射率曲线,与设计值较符合,在波长 1064 nm 处,p 光反射率为 0.35%,s 光反射率为 0.31%,在  $-20 \sim 20$  nm 带宽范围内反射率均低于 0.5%。

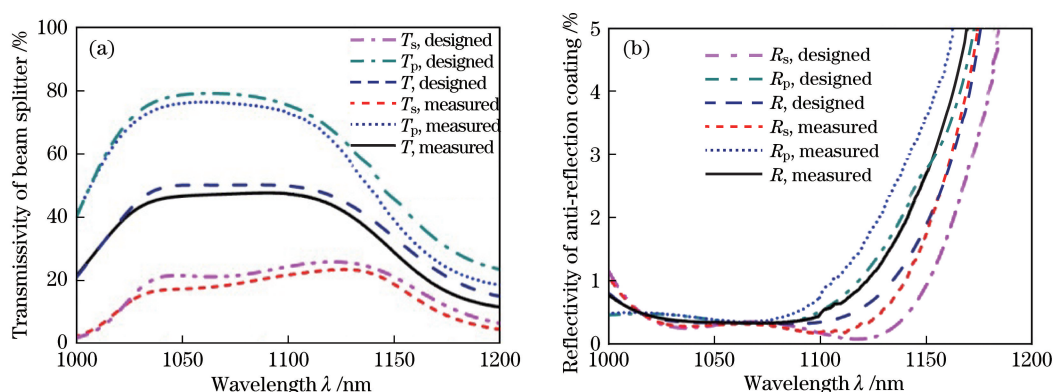


图 4 (a) 分束镜的透射率测试曲线;(b)减反射膜的反射率测试曲线

Fig. 4 (a) Curves of measured transmissivity of beam splitter; (b) curves of measured reflectivity of anti-reflection coating

在入射角为  $45^\circ$  的情况下,样品透射和反射的椭偏参数( $\psi, \Delta$ )用美国 J.A. Woolam 公司生产的 M-2000 椭偏仪测试。M-2000 光谱型椭偏仪可以测量可见光至近红外光波段样品的椭偏参数,在近红外波段,测量的波长间隔约为 3.4 nm。实际测试中可测得波长为 1063.1 nm 和 1066.6 nm 处的值,通过线性插值法得到波长 1064 nm 处的椭偏参数值。

图 5 为样品的椭偏参数测量值,反射条件下样品在波长 1064 nm 处的椭偏参数( $\psi_r, \Delta_r$ )=( $28.8^\circ, 140.8^\circ$ ),在 1052.2~1075.8 nm 波长范围内, $\psi_r$  的值为  $28.8^\circ \sim 29.2^\circ$ , $\Delta_r$  的值为  $139.7^\circ \sim 143.1^\circ$ 。透射条件下波长 1064 nm 处的椭偏参数( $\psi_t, \Delta_t$ )=( $65.4^\circ, 54.4^\circ$ ),在 1052.2~1075.8 nm 波长范围内, $\psi_t$  的值为  $64.5^\circ \sim 65.7^\circ$ , $\Delta_t$  的值为  $53.1^\circ \sim 56.2^\circ$ 。由此可以得到  $\Delta_r - \Delta_t$  和  $\psi_r + \psi_t$  的测试值,如图 5(c)所示。样品在波长 1064 nm 处  $\Delta_r - \Delta_t$  的值为  $86.4^\circ$ ,同时  $\psi_r + \psi_t$  的值为  $94.2^\circ$ 。在 1052.2~1075.8 nm 波长范围内, $\Delta_r - \Delta_t$  的值为  $86.4^\circ \sim 86.9^\circ$ ,而  $\psi_r + \psi_t$  的值为  $93.8^\circ \sim 94.6^\circ$ 。所有的测试结果与理论设计值吻合较好。

图 6 为减反射膜的透射相位延迟  $\Delta_t$  的测试结果,在 1020~1100 nm 波长范围内测试结果与理论值都非常接近,偏差小于  $0.2^\circ$ ,在 1064 nm 波长处  $\Delta_t = -0.1^\circ$ ,得到了很好的控制。

利用以上测试结果,由(3)式可计算得出仪器矩阵  $\mathbf{A}$  行列式的归一化参数值  $|\det \mathbf{A}|_{\text{norm}}$ ,如图 7 所示。在波长 1064 nm 处, $|\det \mathbf{A}|_{\text{norm}} = 0.978$ ,在 1045.5~1099.4 nm 波长范围内, $|\det \mathbf{A}|_{\text{norm}} > 0.97$ ,说明所制备的分束镜参数与理论设计值基本匹配。

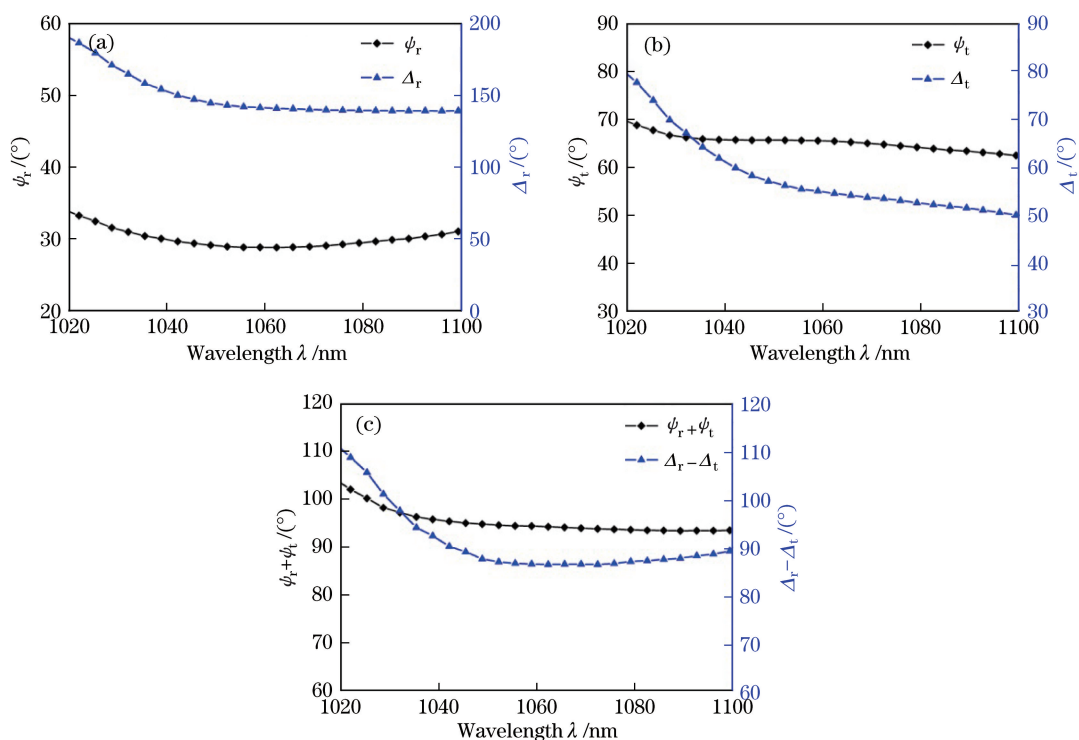


图 5 分束镜椭偏参数的测试值曲线。(a)  $(\psi_r, \Delta_r)$ ; (b)  $(\psi_t, \Delta_t)$ ; (c)  $(\psi_r + \psi_t)$  和  $(\Delta_r - \Delta_t)$

Fig. 5 Curves of measured ellipsometric parameters of beam splitter. (a)  $(\psi_r, \Delta_r)$ ; (b)  $(\psi_t, \Delta_t)$ ; (c)  $(\psi_r + \psi_t)$  and  $(\Delta_r - \Delta_t)$

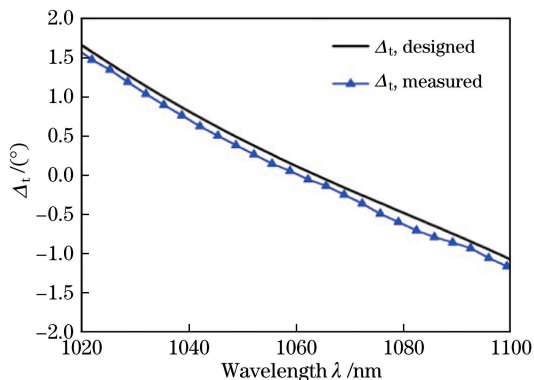


图 6 减反射膜的透射相位延迟测试值曲线

Fig. 6 Curves of measured phase delay for transmission in anti-reflection coating

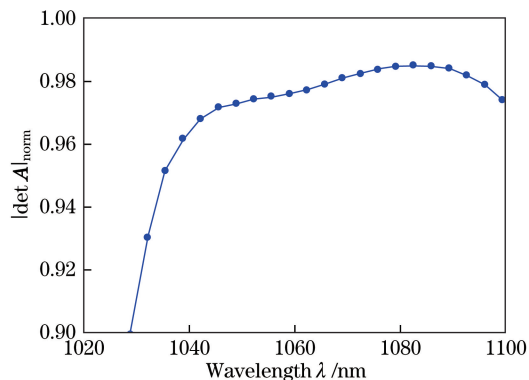


图 7 系统仪器矩阵行列式的归一化值曲线

Fig. 7 Curve of normalized determinant of instrument matrix of system

## 5 结 论

为分振幅光偏振测量仪设计并制备了一种多层介质薄膜结构的差分相移分束镜,入射角为  $45^\circ$ ,在波长 1064 nm 处分光比为 1:1,且 s 光与 p 光透射率的比值为 0.268;对反射和透射的差分相移  $\Delta_r - \Delta_t$  进行优化,使其满足  $\Delta_r - \Delta_t = \pi/2$ ,以匹配最优参数。在基板背面镀上减反射膜,以降低背面反射以及减小光束透过基板后的相位延迟。采用离子束溅射沉积方法制备样品,在波长 1064 nm 处分束镜的仪器矩阵行列式的归一化参数值为 0.978,在 1045.5~1099.4 nm 波长范围内,其值大于 0.97,表明实验结果与设计要求基本匹配,能够较好地满足设计要求。

## 参 考 文 献

[1] Berry H G, Gabrielse G, Livingston A E. Measurement of the Stokes parameters of light[J]. Appl Opt, 1977, 16(12): 3200-3205.

- [2] Gori F. Measuring Stokes parameters by means of a polarization grating[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(9): 584-586.
- [3] Kihara T. Measurement method of Stokes parameters using a quarter-wave plate with phase difference errors[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(17): 2582-2587.
- [4] Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.* Method of improving measurement accuracy of parameters[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0408066.  
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测量精度的方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0408066.
- [5] Zhang Xuebing, Li Yanqiu, Zheng Meng, *et al.* Calibration and error compensation of an imaging polarimeter based on rotating quarter-wave plate method[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0708007.  
张雪冰, 李艳秋, 郑 猛, 等. 旋转波片法成像斯托克斯偏振仪误差标定和补偿[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0708007.
- [6] Kanseri B, Rath S, Kandpal H C. Direct determination of the generalized Stokes parameters from the usual Stokes parameters[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(6): 719-721.
- [7] Azzam R M A. Division-of-amplitude photopolarimeter (DOAP) for the simultaneous measurement of all four Stokes parameters of light[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1982, 29(5): 685-689.
- [8] Du Xiliang, Dai Jingmin. Review of division-of-amplitude photopolarimeter[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, 27(4): 325-330.  
杜西亮, 戴景民. 分振幅光偏振测量仪[J]. *计量学报*, 2006, 27(4): 325-330.
- [9] Li Li, Liu Xu, Li Haifeng. A study of division-of-amplitude photopolarimetric system using prism beam splitter[J]. *Optical Instruments*, 1999, 21(4-5): 159-165.  
李 力, 刘 旭, 李海峰. 分光棱镜型分振幅光度式偏振测量系统的研究[J]. *光学仪器*, 1999, 21(4-5): 159-165.
- [10] Azzam R M A, De A. Optimal beam splitters for the division-of-amplitude photopolarimeter[J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20(5): 955-958.
- [11] Azzam R M A, Sudrajat F F. Single-layer-coated beam splitters for the division-of-amplitude photopolarimeter[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(2): 190-196.
- [12] Born M, Wolf E. *Principles of optics*[M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [13] Azzam R M A, Lopez A G. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarizing optical elements[J]. *J Opt Soc Am A*, 1989, 6(10): 1513-1521.
- [14] Azzam R M A. Arrangement of four photo-detectors for measuring the state of polarization of light[J]. *Opt Lett*, 1985, 10(7): 309-311.
- [15] Wang Yonghui, Zheng Chunlong, Zhao Zhentang. Multi-point calibration method based on Stokes ellipsometry system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108013.  
王勇辉, 郑春龙, 赵振堂. 基于斯托克斯椭偏测量系统的多点定标法[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108013.