

文章编号: 0258-7025(2010)04-0979-08

大口径消色差波片的研制

王东光 邓元勇 张志勇 孙英姿 玄伟佳

(中国科学院太阳活动重点实验室, 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要 高质量的消色差波片是太阳望远镜实现多波段观测的重要元件, 它的消色差性能直接限制观测仪器的工作波长范围。通过对不同类型的消色差波片性能的理论分析与比较, 优选出消色差性能最佳的由 5 片同种折射材料组成的消色差波片。对研制的 $\phi 37$ mm 口径聚乙烯醇 (Polyvinyl Alcohol) 塑料波片性能参数的测试显示, 在 486.1~656.3 nm 波长范围内, $\lambda/2$ 波片延迟的绝对误差小于 $\lambda/350$, 光轴误差小于 $\pm 0.2^\circ$; $\lambda/4$ 波片延迟的绝对误差小于 $\lambda/160$, 光轴误差小于 $\pm 0.6^\circ$ 。在温度变化 20~65 $^\circ\text{C}$ 范围内, 延迟随温度变化在 10^{-4} 量级, 视场效应明显优于双折射晶体。以上测试结果表明, 这种聚乙烯醇塑料波片可以用于整个可见光区域, 且具有极好的温度效应和视场效应, 适用于多波长需求的仪器。

关键词 物理光学; 消色差波片; 聚乙烯醇薄膜; 延迟; 光轴

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20103704.0979

Development of Achromatic Waveplate with Large Aperture

Wang Dongguang Deng Yuanyong Zhang Zhiyong Sun Yingzi Xuan Weijia

(Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract Observed Fraunhofer spectrums are limited by achromatic performance of waveplates in solar magnetic field telescope. Comparing to the different kinds of achromatic waveplates, one which composes of five-element of polyvinyl alcohol film is chosen due to its good performance in whole scope of visible wavelength. Analyzing the measurement datum from 486.1 nm to 656.3 nm, it is found that the maximum error of retardance is in the orders of $\lambda/350$ and $\lambda/160$ for half wave plate and quarter wave plate respectively, and the maximum error of axis azimuth is in the orders of 0.2° and 0.6° for half wave plate and quarter wave plate respectively. From the measurement data, this kind of waveplate made of polyvinyl alcohol film can be used in the whole visible spectrum, and has good performance comparing to that of birefringent crystal which is insensitive to temperature and incident angle.

Key words physical optics; achromatic waveplate; polyvinyl alcohol film; retardance; axis azimuth

1 引言

双折射滤光器是实现太阳单色像和太阳磁场观测的主要手段之一, 波片是该种滤光系统的基本光学元件。为实现一台望远镜对太阳进行多波段观测, 国内外最新研制的大型望远镜都选用了消色差波片。

用于太阳望远镜的波片通光口径比较大, 一般约为 40 mm, 常用的两种消色差波片为晶体消色差波片和组合消色差波片。晶体波片是利用双折射晶体的双折射率随波长变化的原理设计的, 因此它是由不同种材料组合的消色差波片。石英、氟化镁晶体制作的晶体波片使用最多, 已成功地用于国家天

文台的多通道滤光器之中^[1,2]。组合波片是通过选择每个单片波片的延迟大小和光轴方向来实现消色差功能的^[3,4]。它由多片同种材料组成, 每片材料可以选择双折射晶体(石英、云母等), 也可以选用塑料延迟膜。

正在研制的空间太阳望远镜二维光谱仪, 需要一百多片消色差波片, 且要求能在 393.3~656.3 nm 之间的 10 个波长工作, 消色差波片的研制极为重要。本文通过分析与比较不同组合的消色差波片的消色差性能, 得到采用由同种双折射材料组合的 5 片型消色差波片具有最优的性价比, 进而

收稿日期: 2009-04-18; 收到修改稿日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(10778723, 10878016, 10803012)资助课题。

作者简介: 王东光(1966—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事偏振光学与太阳磁场观测技术方面的研究。

E-mail: wdg@bao.ac.cn

给出了对研制的 $\phi 37$ mm 口径聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol)塑料波片性能参数的测试结果。

2 消色差波片的性能分析

2.1 消色差波片的设计

2.1.1 晶体消色差波片

晶体波片的设计公式为

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{\mu_1 d_1}{\lambda_1} + \frac{\mu_2 d_2}{\lambda_1}, \\ \delta_2 &= \frac{\mu'_1 d_1}{\lambda_2} + \frac{\mu'_2 d_2}{\lambda_2}. \end{aligned} \quad (1)$$

当波长 λ_1, λ_2 和在这两个波长对应的两种晶体的双折射率 $\mu_1, \mu'_1, \mu_2, \mu'_2$ 已知时,令组合波片延迟 δ_1 和 δ_2 在 λ_1, λ_2 两波长处相等,就可以求出它们的厚度 d_1, d_2 , 从而实现消色差的目的。

2.1.2 组合消色差波片

由文献[5]知,由同种双折射材料组成的消色差波片的消色差条件为

- 1)组合波片由奇数个单片构成;
- 2)位于中间的单片的相位延迟在消色差范围的中心波长处为 $\lambda/2$ 波片;
- 3)以中间片为对称轴,位于其两边的对称单片相位延迟相等,光轴方向平行。

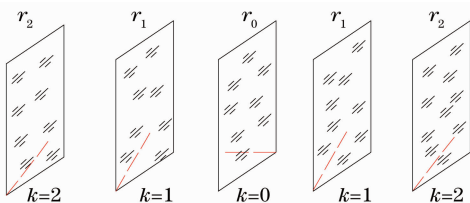


图 1 5 片型消色差波片结构示意图

Fig. 1 Schematic of five-element achromatic waveplate structure

图 1 所示为满足消色差条件的 5 片组合型消色

表 3 5 片型组合波片所需的单片晶体设计参数

Table 3 Parameters in five-element achromatic waveplate

	r_2		r_1		r_0	
	Retardance	Azimuth	Retardance	Azimuth	Retardance	Azimuth
$\lambda/4(\Phi=0^\circ)$	81°	$-49^\circ 34'$	180°	$57'$	180°	$73^\circ 36'$
$\lambda/2(\Phi=0^\circ)$	180°	$-38^\circ 57'$	180°	$-10^\circ 18'$	180°	$57^\circ 17'$

2.2 消色差波片的偏振性能

图 2,3 给出了不同组合消色差波片的性能比较,单个波片的参数为上节计算结果。其中 data1 为 5 片型组合波片,data2 为 3 片型组合波片,data3 为 MgF_2 与石英组合,data4 为 MgF_2 与 ADP 组合,data5 为 MgF_2 与 KDP 组合,data6 为 KDP 与 ADP

差波片的结构示意图。对于由任意奇数单片对称排列组成的消色差波片,组合后的延迟 Δ 和光轴方位角 Φ 为

$$\begin{cases} \Delta_k = \arccos A_k \\ \Phi_k = \theta_k + \frac{1}{2} \arctan \frac{B_k}{C_k} \end{cases} \quad (2)$$

系数 A_k, B_k, C_k 的迭代推导式为

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\tau_k} \cdot \begin{bmatrix} A_{k-1} \\ D_{k-1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} D_k \\ C_k \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\alpha_k} \cdot \begin{bmatrix} B_{k-1} \\ C_{k-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 k 为单片所在的序数, \mathbf{R} 为旋转矩阵, $\tau_k = 2\delta_k$, $\alpha_k = 2(\theta_{k-1} - \theta_k)$, 2δ 为单片的延迟, θ 为单片的光轴方位角。

初始值: $A_0 = \cos \delta_0, B_0 = \sin \delta_0, C_0 = 0$ 。按照消色差条件, $2\delta_0 = 180^\circ, \theta_0 = 0$ 。

根据(1)~(4)式,可以得到各种不同组合的消色差波片的设计参数^[6,7],如表 1~3 所示。

表 1 晶体波片所需的 2 片型单片晶体厚度

Table 1 Thickness of crystals in two-element achromatic waveplate

Element	Quarter waveplate /mm		Half waveplate /mm	
$MgF_2^M/Quartz^Q$	0.215 ^M	0.263 ^Q	0.43 ^M	0.526 ^Q
MgF_2^M/ADP^A	0.115 ^M	0.027 ^A	0.23 ^M	0.054 ^A
MgF_2^M/KDP^K	0.096 ^M	0.024 ^K	0.192 ^M	0.048 ^K
ADP^A/KDP^K	0.13 ^A	0.139 ^K	0.26 ^A	0.278 ^K

注:上标代表材料种类。

表 2 3 片型组合波片所需的单片晶体设计参数

Table 2 Parameters in three-element achromatic waveplate

	r_1		r_0	
	Retardance	Azimuth	Retardance	Azimuth
$\lambda/4(\Phi=0^\circ)$	$115^\circ 32'$	$-30^\circ 45'$	180°	$39^\circ 28'$
$\lambda/2(\Phi=0^\circ)$	180°	$-30^\circ 50'$	180°	$28^\circ 20'$

组合。

从图中可以看出, MgF_2 晶体与石英组合的晶体波片及 3 片型的组合波片在 6 种组合中,消色差性能最差; MgF_2 晶体与 ADP, KDP 组合的波片性能极其相近;与晶体波片相比,组合波片存在一大缺陷,即组合后的光轴方位角随波长变化。但仔细分

析曲线可以发现,5 片型组合波片在 500~600 nm 范围内,它的延迟随波长变化在几种组合中最小,光轴方位角的变化也很小。鉴于在太阳磁场观测中,可见光的磁敏线主要分布于这个波段,因此,5 片型

组合的消色差波片将作为主要选择。对于 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 波片,与 3 片组合相比,它的延迟均方差分别提高 6 倍和 2 倍,光轴方位角均方差分别提高 1 倍和 3 倍。

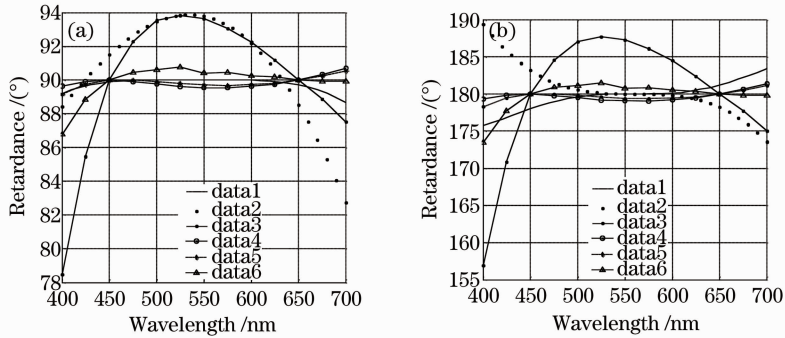


图 2 不同组合消色差波片的延迟。(a) $\lambda/4$ 波片;(b) $\lambda/2$ 波片

Fig. 2 Retardance comparison of different achromatic waveplates. (a) $\lambda/4$ waveplate; (b) $\lambda/2$ waveplate

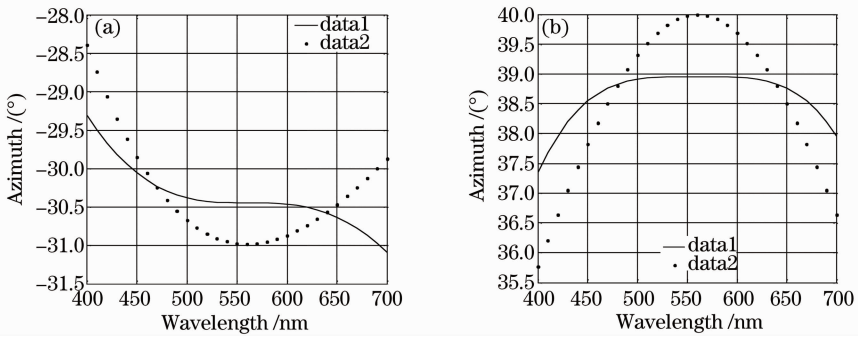


图 3 3 片型与 5 片型消色差光轴比较。(a) $\lambda/4$ 波片;(b) $\lambda/2$ 波片

Fig. 3 Comparison of azimuth between three-element and five-element achromatic waveplates. (a) $\lambda/4$ waveplate; (b) $\lambda/2$ waveplate

3 组合消色差波片的误差控制

根据分析,初步选择 MgF_2 晶体与 ADP 晶体, KDP 晶体组合的两种晶体波片和 5 片型的组合波片作为研究对象。但是通过对 ADP 晶体和 KDP 晶体材料的调研,发现这两种材料对加工工艺要求极严,KDP 晶体的潮解现象使得它的保存与使用都很困难。比较之后,确定研制 5 片型的组合波片。

对于 5 片型的组合波片,理论上各个单片可以选择任何一种双折射材料,鉴于晶体做成真正的零级波片很难,考虑同样具有双折射性质的聚乙烯醇塑料薄膜制作 5 片型消色差波片。经过比较,选用日本 KURARRY 公司生产的聚乙烯醇薄膜。

下面分别讨论 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片受单片薄膜误差影响的情况(其中 r_0 片, r_1 片和 r_2 片分别对应图 1 中各单片)。将单片薄膜可能出现的误差情况进行不同组合,发现它们对组合后波片性能的影响规

律,通过合理搭配,减小单片误差对组合效果的影响。

对于 $\lambda/2$ 波片,讨论结果如下:

1)在图 4(a)中,data1:各单片延迟都是计算值,data2: r_0 片延迟误差 $+1^\circ$,data3: r_0 片延迟误差 -1° ,data4: r_1 片延迟误差 $+1^\circ$,data5: r_1 片延迟误差 -1° ;data6: r_2 片延迟误差 $+1^\circ$,data7: r_2 片延迟误差 -1° 。可见,单片延迟误差对组合波片延迟影响如下: r_0 片和 r_1 片延迟增加,组合波片的延迟也增加;而 r_1 片延迟增加,组合片延迟减小。

2)在图 4(b)中,data1:各单片方位角都是计算值,data2: r_0 片方位角误差 $+1^\circ$,data3: r_0 片方位角误差 -1° ,data4: r_1 片方位角误差 $+1^\circ$,data5: r_1 片方位角误差 -1° 。可见,单片方位角误差对组合波片延迟的影响: r_0 片方位角误差为负或 r_1 片方位角误差为正时,组合波片的消色差范围增大;反之,消

色差范围缩小。即:单片方位角误差影响组合波片延迟的消色差范围。

3)在图 4(c)中, r_0 片方位角误差 $+1^\circ$ 时,data1:各片延迟都为计算值,data2: r_0 片延迟误差 $+1^\circ$,data3: r_2 片延迟误差 $+1^\circ$;data4: r_1 片延迟误差 $+1^\circ$ 。在图 4(d)中, r_1 方位角误差 $+1^\circ$ 时,data1:各片延迟都为计算值,data2: r_0 片延迟误差 $+1^\circ$,data3: r_1 延迟误差 $+1^\circ$,data4: r_2 片延迟误差 $+1^\circ$ 。当单片波片存在角度误差时,各个单片的延迟误差不会改变组合波片延迟的曲线形状,只是使曲线抬高或降低。说明各个单片的延迟与光轴方位角对组合延迟的影响是相对独立的,不能通过延迟与方位角误差之间的匹配调整延迟。

4)在图 5(a)中,data1:各单片延迟都是计算值,data2: r_0 片延迟误差 $+1^\circ$,data3: r_0 延迟误差 -1° ,data4: r_1 片延迟误差 $+1^\circ$,data5: r_1 延迟误差 -1° ,data6: r_2 片延迟误差 $+5^\circ$,data7: r_2 片延迟误差 -5° 。单片延迟误差对组合波片方位角的影响: r_0 片和 r_1 片的延迟误差降低组合波片方位角的消色差性能,而 r_2 片的延迟误差对组合方位角的影响极小。

5)在图 5(b)中,data1:各单片方位角都为理想

计算值,data2: r_0 片方位角误差 -1° ,data3: r_0 片方位角误差 $+1^\circ$,data4: r_1 片方位角误差 -1° ,data5: r_1 片方位角误差 $+1^\circ$ 。单片方位角误差不会改变组合波片方位角的曲线形状,只是抬高或降低曲线的位置,由于组合波片的光轴方向最终通过修磨基准边确定,因而,单片方位角误差对组合方位角影响很小,可以忽略。

6)在图 5(c),(d)中, r_0 片方位角误差 $+1^\circ$ 时,data1:各片延迟都为计算值,data2: r_0 延迟误差 $+1^\circ$,data3:单片延迟误差都为 $+1^\circ$,data4: r_2 片延迟误差 $+5^\circ$ 。当单片波片存在角度误差时,各个单片延迟的误差对组合波片方位角的影响如同单片波片延迟误差对它的影响。

由上分析可以得出这样的结论:在制作消色差 $\lambda/2$ 波片时,当 r_0 片的延迟为理想值, r_1 片, r_2 片有延迟误差时,应选择两片误差均为正值,且 r_1 片误差是 r_2 片的 $1/3$;当 r_0 片有延迟误差时,则 3 片的延迟误差应该大小相等,符号相同。由图 4(e)可以看出,在这两种情况下,组合波片的消色差性能接近于理想状态。对于因仪器精度而不可消除的方位角误差,应尽可能使 r_0 片的方位角误差为负, r_1 片方位角误差为正。

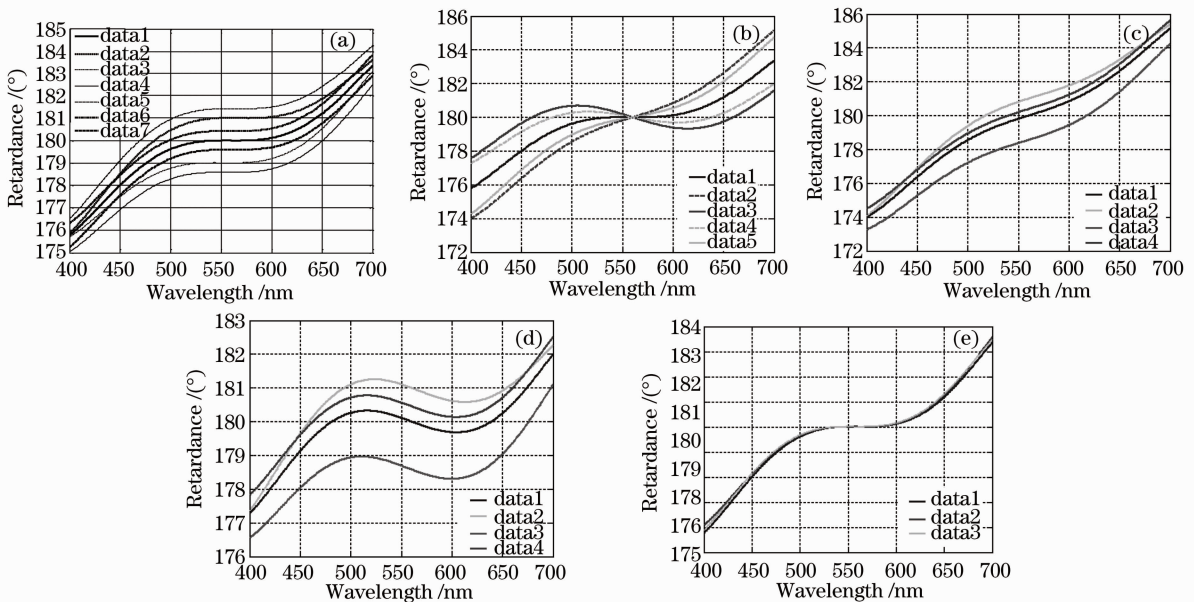


图 4 单片误差对组合 $\lambda/2$ 波片延迟的影响。(a)延迟误差;(b)方位角误差;(c)两项误差同时存在(3片型);(d)两项误差同时存在(5片型);(e)延迟误差调整后

Fig. 4 Effects of errors to retardance of $\lambda/2$ waveplate. (a) retardance errors; (b) azimuth errors; (c) both errors (three-element); (d) both errors (five-element); (e) after retardance errors adjusted

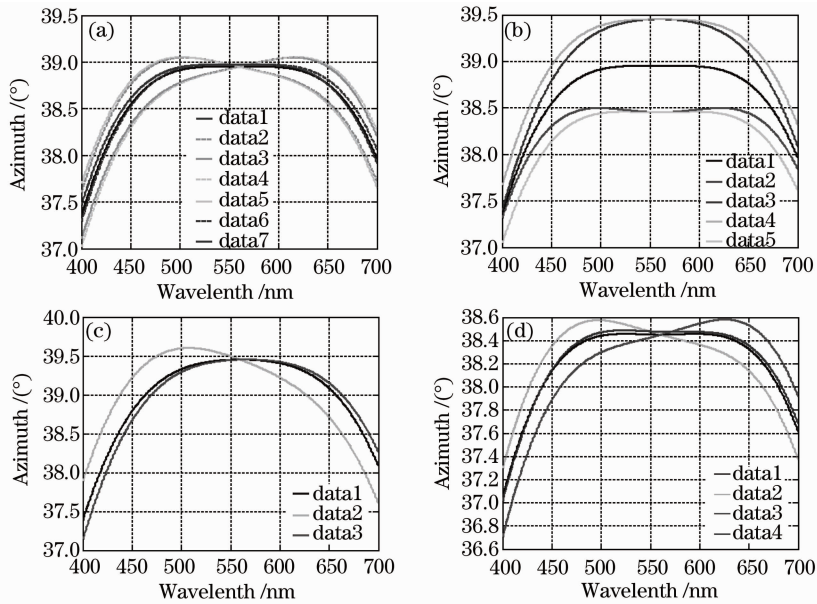


图5 单片误差对组合 $\lambda/2$ 波片方位角的影响。(a)各单片延迟误差;(b)各单片方位角误差;(c)两项误差同时存在(3片型);(d)两项误差同时存在(5片型)

Fig. 5 Effects of errors to azimuth of $\lambda/2$ waveplate. (a) retardance errors; (b) azimuth errors; (c) both errors (three-element); (d) both errors (five-element)

对于消色差 $\lambda/4$ 波片,讨论结果如下:

由于其设计原理同消色差 $\lambda/2$ 波片,同理,各个单片的延迟与光轴方位角对组合延迟与方位角的影响是相对独立的。只考虑两项误差单独作用的结果,不再考虑两项误差同时存在时的情况。

1)图6(a)中,data1:各单片延迟都是计算值,data2: r_0 片延迟误差 $+1^\circ$,data3: r_0 片延迟误差 -1° ,data4: r_1 片延迟误差 $+1^\circ$,data5: r_1 片延迟误差 -1° ,data6: r_2 片延迟误差 $+1^\circ$,data7: r_2 片延迟误差 -1° 。单项延迟误差对组合延迟误差的影响:可以看出, r_0 片和 r_1 片的延迟误差改变组合延迟曲线的形状,降低消色差性能; r_2 片延迟误差改变组合延迟的大小,基本不改变消色差性能。

2)图6(b)中,data1:各个单片方位角都是计算值,data2: r_0 片方位角误差 $+1^\circ$,data3: r_0 片方位角误差 -1° ,data4: r_1 片方位角误差 $+1^\circ$,data5: r_1 片方位角误差 -1° 。可以看出,方位角误差基本上不改变波片的消色差性能,但对延迟大小影响很明显。方位角 1° 的误差,会带来组合波片 2° 的延迟误差。

3)图6(c)中,data1:各单片延迟都是计算值,data2: r_0 片延迟误差 $+1^\circ$,data3: r_0 片延迟误差 -2° ,data4: r_1 片延迟误差 $+1^\circ$,data5: r_1 片延迟误差 -1° ,data6: r_2 片延迟误差 $+1^\circ$,data7: r_2 片延迟误差 -1° 。可以看出,延迟误差不改变曲线形状,只

影响大小。鉴于组合波片的方位角最后依靠磨边确定,因此可以不考虑这项误差影响。

4)图6(d)中,data1:各项都为理想计算值,data2: r_0 片方位角误差 -1° ,data3: r_0 片方位角误差 $+1^\circ$,data4: r_1 片方位角误差 -1° ,data5: r_1 片方位角误差 $+1^\circ$ 。可以看出,当 r_0 片方位角误差为正, r_1 片误差为负时,组合方位角的消色差性能优于与上述相反的情况。

经过上面分析,同 $\lambda/2$ 波片一样,对于 $\lambda/4$ 波片,也可以通过调整各个单片的误差组合,来改善它们对组合波片性能的影响。

1)对于单片延迟误差: r_0 与 r_1 的延迟误差应选择大小相等,符号相同; r_2 片延迟误差取前两片误差的0.45倍。图7(a)显示了调整后的结果。

2)对于单片方位角误差:由于方位角误差对延迟的影响很大,选取方位角误差大小相等,符号相同。图7(b)显示了调整含有方位角误差的单片组合后,波片的组合延迟情况。此时组合方位角情况如图7(c),从图中可以看出,应尽量使方位角误差为负。

按照上面的原则选择各个单片波片的参数,这样,可以适当放松对单片制作精度的要求,使得单片波片的选择范围加大,对于研制需要上百片消色差波片的滤光器更加有意义。

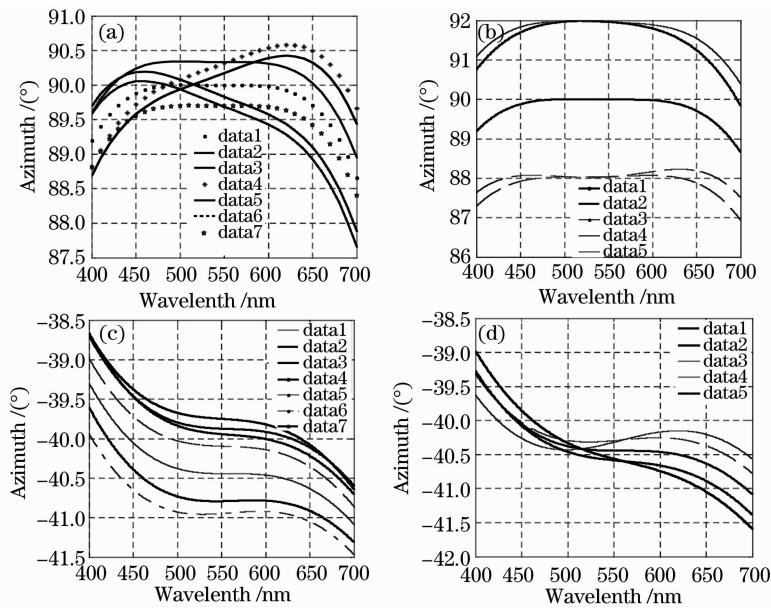


图6 单片误差对组合 $\lambda/4$ 波片延迟的影响。(a)各单片延迟误差;(b)各单片方位角误差;(c)两项误差同时存在(3片型);(d)两项误差同时存在(5片型)

Fig. 6 Effects of errors to retardance of $\lambda/4$ waveplate. (a) retardance errors; (b) azimuth errors; (c) both errors (three-element); (d) both errors (five-element)

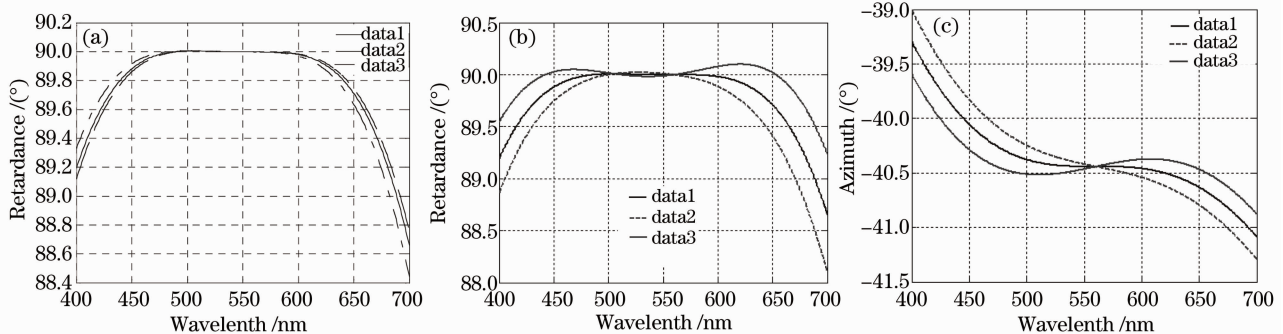


图7 误差调整后,对 $\lambda/4$ 波片的影响。(a)单片延迟误差调整后, $\lambda/4$ 波片的误差;(b)单片光轴误差调整后, $\lambda/4$ 波片的延迟;(c)单片光轴误差调整后, $\lambda/4$ 波片的方位角

Fig. 7 Effects of $\lambda/4$ waveplate after errors adjusted. (a) retardance of $\lambda/4$ waveplate after retardance errors adjusted; (b) retardance of $\lambda/4$ waveplate after azimuth errors adjusted; (c) azimuth of $\lambda/4$ waveplate after azimuth errors adjusted

4 组合消色差波片的偏振性能测试

采用高精度偏振元件测量仪^[8,9],根据不同的测量项目要求,通过调整仪器,对消色差 $\lambda/4$ 波片与 $\lambda/2$ 波片做了偏振参数的测试,包括它们的延迟与方位角在可见光10个波长处的情况、波片延迟随温度变化的情况、波片在有一定入射角的入射光线下的情况。

4.1 消色差波片的延迟与方位角的测试结果

在可见光区域选择太阳物理常用的10条谱线的波长,分别测量组合消色差波片的延迟与光轴方

位角,得到测量值与标准值的相对误差,如表4所示。可知,在486.1~656.3 nm波长范围内, $\lambda/2$ 波片延迟的最大相对误差为1.05% (绝对误差 $\lambda/350$),光轴误差小于 $\pm 10'$, $\lambda/4$ 波片延迟的最大相对误差为2.5% (绝对误差 $\lambda/160$),光轴误差小于 $\pm 35'$ 。美国专业生产偏振元件的Meadowlark公司制作的精密消色差波片,口径 $\phi 25$ mm,在485~630 nm范围内, $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片的绝对延迟误差为 $\lambda/100$ 。

表 4 组合消色差波片的延迟与光轴方位角的测量结果

Table 4 Measuring result of retardance and azimuth of achromatic waveplate

Wavelength /nm	Half waveplate		Quarter waveplate	
	Retardance /(°)	Azimuth /(°)	Retardance /(°)	Azimuth /(°)
393.3	173	-2.37	88.7	+0.86
422.6	176.22	-0.37	90.75	+0.35
486.1	179.53	-0.15	91.1	+0.43
517.3	181.69	+0.05	92	+0.03
525.0	181.00	+0.05	90.36	0.00
532.4	181.08	0.00	90.21	-0.116
587.6	181.77	+0.017	92.23	-0.56
610.3	181.89	-0.017	91.94	-0.48
630.2	181.4	-0.05	91.46	-0.52
656.3	181.62	+0.017	91.8	-0.5

4.2 温度效应

选取两个组合消色差波片样品,在 $\lambda = 656.3 \text{ nm}$ 处,将被测波片放在高精度偏振测量仪的恒温筒内,利用温控仪器,调节恒温筒内的温度,使其从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 以一定的间隔增加到 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,在每一个温度处测量一次延迟数值,记入表 5 中,图 8 为两块消色差波片的延迟随温度的变化曲线。从中可见,组合波片在 $20 \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,温度随波长的变化都在 10^{-4} 量级内,而且并不是线性变化的,与晶体波片的 10^{-3} 相比^[1],降低了一个数量级。当温度达到 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,延迟突然以 10^{-3} 的量级增加。为保险起见,此种组合波片的使用温度应低于 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 5 消色差波片的延迟随温度的变化

Table 5 Variation of retardance of achromatic waveplate with temperature

Temperature /°C	Retardance / λ	Temperature /°C	Retardance / λ
20	0.5016	34	0.5024
21	0.5020	35	0.50233
22	0.5022	36	0.5021
23	0.5023	37	0.5022
24	0.5022	40	0.50179
25	0.5022	45	0.5017
26	0.5024	50	0.50179
27	0.5023	53	0.5016
28	0.50225	55	0.5016
29	0.50233	60	0.5015
30	0.50237	65	0.5016
31	0.50245	70	0.5049
32	0.50225	80	0.5067
33	0.5023	100	0.5192

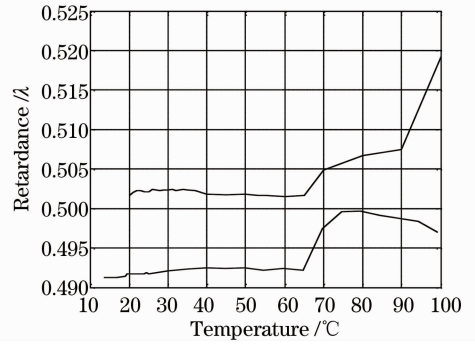


图 8 组合消色差波片的温度效应

Fig. 8 Variation of retardance with temperature

4.3 视场效应

图 9 给出了单片塑料波片与晶体波片的延迟随入射角变化的情况。另外还对两种材料组合的波片进行了定性比较。将晶体组合波片和塑料组合波片同时置于垂直偏振场中,它们的光轴方位角与偏振片成 45° ,将白光光源放在起偏器前面,可以看到前者出现彩色的双曲线条纹,后者则看不到这种现象,如图 10。两种结果都表明,入射角对塑料波片的影响远远小于双折射晶体材料,非常适于大视场的光学系统。

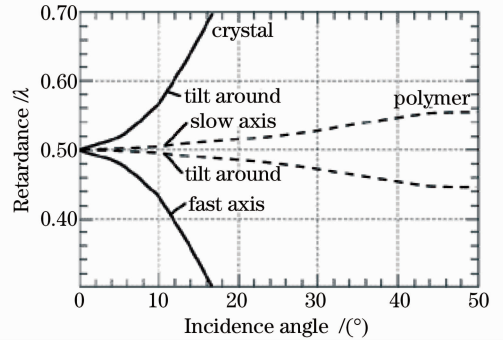


图 9 塑料波片与晶体波片的延迟随入射角的变化

Fig. 9 Variation of retardance of polymer and crystal with incidence angle

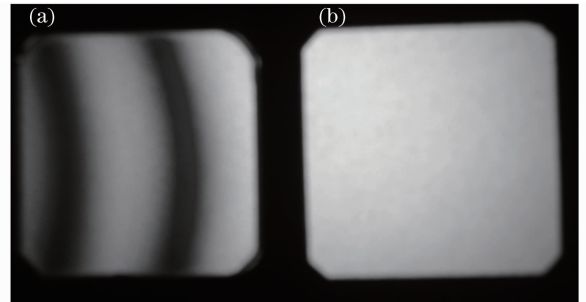


图 10 晶体组合波片(a)与塑料组合波片(b)视场效应的比较

Fig. 10 Comparison of view field between waveplates made of crystal (a) and plastic (b)

5 结 论

通过理论分析和对制作样品的测试,研制的5片型大口径消色差波片具有很好的消色差性能,在486.1~656.3 nm波长范围内, $\lambda/2$ 波片延迟的最大相对误差为1.05%(绝对误差 $\lambda/350$),光轴误差小于 $\pm 10'$, $\lambda/4$ 波片延迟的最大相对误差为2.5%(绝对误差 $\lambda/160$),光轴误差小于 $\pm 35'$ 。而且选用的聚乙烯醇塑料薄膜材料体现出零级波片的优点,在20~65℃范围内,温度随波长的变化在 10^{-4} 量级内,比晶体波片降低了一个数量级,而且受入射角影响小。测试结果表明,该消色差波片消色差性能等同于或优于国外同类产品,具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- Deng Yuanyong, Ai Guoxiang, Wang Jingshan. Development of high-quality achromatic waveplate[J]. *Chinese J. Astronomy and Astrophysics*, 1993, **13**(3): 283~290
邓元勇,艾国祥,王敬山. 高质量消色差波片的研制[J]. *天体物理学报*, 1993, **13**(3): 283~290
- Hu Yuefeng, Ai Guoxiang. Achromatic waveplates[J]. *Optical Technique*, 1984, (2): 2~5
胡岳风,艾国祥. 消色差波片[J]. *光学技术*, 1984, (2): 2~5
- A. M. Title. Improvement of birefringent filters. 2: achromatic waveplates[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(1): 229~237
- S. Pancharatnam. Achromatic combinations of birefringent plates[J]. *Proc. Indian Acad. Sci. A*, 1955, **41**: 130~137
- V. A. Kucherov. Multicomponent symmetric achromatic retarders. II. Composite retarders with small number of elements[J]. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 1986, **2**(1): 82~88
- Wang Jingshan, Ai Guoxiang, Song Guofeng. Development of PVA achromatic film[J]. *Optical Technique*, 1995, (Suppl.): 73~77
王敬山,艾国祥,宋国峰. PVA消色差波片的研制[J]. *光学技术*, 1995, (增刊): 73~77
- J. M. Beckers. Achromatic linear retarders[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**: 973~975
- Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Hongqi *et al.*. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate[J]. *Acta Optics Sinica*, 2006, **26**(5): 685~688
孙英姿,王东光,张洪起等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 685~688
- Zhang Zhiyong, Deng Yuanyong, Wang Dongguang *et al.*. Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 68~72
张志勇,邓元勇,王东光等. 几种波片位相延迟测试方法的比较[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(11): 68~72