

doi:10.3788/gzxb20184701.0126001

双复合光楔偏振调制模块消色差研究

韩琪玥^{1,2,3}, 李双^{1,3}, 韩琳^{1,3}, 袁齐^{1,2,3}

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

(3 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

摘 要: 为了提高空间振幅调制光谱偏振测量系统中光谱偏振数据和图像的采样精度, 对偏振调制模块-双复合光楔调制器的消色差特性进行了研究. 根据双复合光楔的消色差原理及其结构形式, 分析了不同双折射晶体材料构成的双复合光楔调制器相位延迟量的一阶导数与晶体材料双折射率、楔角的关系, 并利用 Matlab 软件数值模拟寻找最优组合. 基于理论分析, 采用 KDP-石英组合与石英-石英组合进行对比实验, 结果表明: KDP-石英组合一级亮条纹相位延迟量对波长的一阶导数数值小于石英-石英组合, 证明了 KDP-石英组合消色差特性优于石英-石英组合, 其结果与理论分析一致.

关键词: 偏振; 光谱; 晶体组合; 复合光楔; 空间调制; 消色差; 双折射率; 楔角

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)01-0126001-6

Achromatic Study on Double Combo Wedge Polarization Modulation Module

HAN Qi-yue^{1,2,3}, LI Shuang^{1,3}, HAN Lin^{1,3}, YUAN Qi^{1,2,3}

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Sciences and Technology of China, Hefei 23002, China)

(3 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The achromatic characteristic of polarization modulation module- double combo wedges modulator was studied, in order to improve the sampling accuracy of spectral polarization data and image in spatial modulating spectropolarimetry. According to the achromatic principle and the structure of the double combo wedges, the relationship between the first derivative of the phase retardance of the double combo wedges modulator and the birefringence and the wedge angle was deduced, which the double combo wedges modulator was composed by different birefringent crystal materials. The Matlab program was used to find the optimal combination. Based on the theory, the experimental contrast was carried on with KDP-Quartz and Quartz-Quartz combination. The experimental results show that the data of the first-order bright stripe of the KDP-Quartz combination is smaller than that of the Quartz-Quartz combination. The achromatic characteristic of KDP-Quartz combination is better than that of Quartz-Quartz combination, which is consistent with the theoretical analysis.

Key words: Polarimetry; Spectrum; Crystal combination; Combo wedge; Spatial modulation; Achromatic; Birefringence; Wedge angle

OCIS Codes: 260.5430; 260.1440; 120.5410; 120.6200; 160.4670; 300.6550

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金(No. U1331111)和空间调制型光谱偏振成像关键技术研究课题(No. KJS1605)资助

第一作者: 韩琪玥(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为偏振光谱遥感仪器的工程光机设计. Email: hanqiyue1993@163.com

导师(通讯作者): 李双(1976-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为偏振光谱遥感探测技术. Email: shli@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2017-07-11; **录用日期:** 2017-09-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光谱偏振测量技术是近年来在光学遥感领域中新发展起来的一种新兴探测技术,被广泛应于云和大气气溶胶的探测^[1]、生物医学诊断^[2]、环境资源监测^[3]、军事侦察^[4]等领域.空间振幅调制是光谱偏振测量技术研究的热点,其调制器件分为楔形棱镜^[5]、萨瓦偏光镜^[6]以及偏振光栅^[7].2003年日本学者 oka 首次提出楔形棱镜方案,在偏振成像仪中结合薄双折射楔形棱镜,实现对空间分布的同一目标不同偏振分量的同时探测^[8].基于楔形棱镜的概念,文献^[9]使用空间振幅调制光谱偏振测量方法增加狭缝和光栅色散系统,利用复合光楔偏振调制器将偏振信息调制在与色散方向相垂直的空间维方向,实现了同时获取目标偏振信息和光谱信息,使偏振测量和光谱测量独立优化.

2012年,William Sparks 等^[9]对单光楔在偏振调制器上的应用进行研究.由于从偏振光中产生的条纹有明显的“斜率”(条纹倾斜度),而单光楔的厚度不均匀会引入多级延迟效应,因此,为消除此影响,William Sparks 等人对调制器进行改进,将两个相同光楔以相反方向复合取代单光楔,在两楔厚度相等的地方抵消延迟效应,以此减轻双折射色散.由于延迟量是波长和空间方向的函数,所以条纹倾斜度一定存在,利用双折射晶体的折射率与波长关系可以进一步优化调制器,减小延迟量对波长的敏感度,减缓条纹倾斜,达到更好的消色差效果.

本文以消色差理论为基础,分析了不同材料不同楔角的复合光楔偏振调制器的消色差特性,对优选的复合光楔消色差组合进行实验验证,并与实验室早期的研究结果进行对比,表明使用优选的复合光楔消色差组合可有效地减轻调制模块中相位延迟量对波长的依赖,使条纹在光谱维度上平行.

1 消色差原理

空间振幅调制光谱偏振测量结构见图1,主要由偏振调制模块和色散部分组成,其中偏振调制模块包括双折射晶体复合光楔和检偏器.两组双折射晶体复合光楔依次以 W_1 和 W_2 表示,每组复合光楔的光轴相互垂直,如图2所示,类似于巴俾涅补偿器^[10]的工作原理.

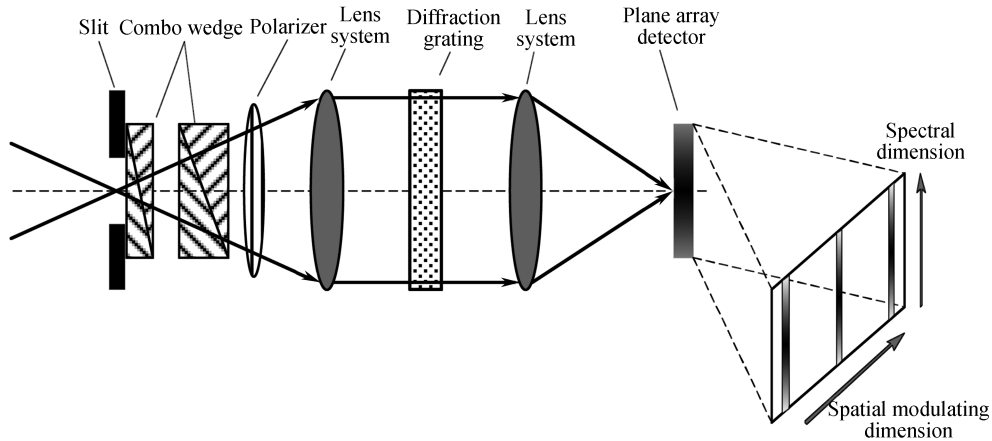


图1 空间振幅调制光谱偏振探测技术原理

Fig.1 Optical sketch for spatial amplitude modulating spectropolarimetry

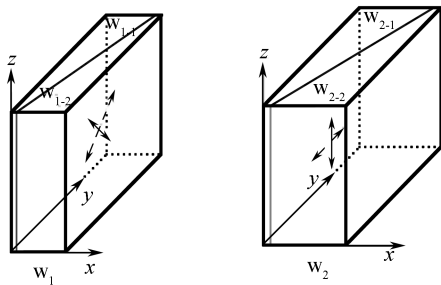


图2 复合双光楔结构

Fig.2 Layout of combo wedge

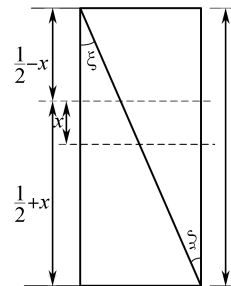


图3 单组复合光楔 W_1 结构

Fig.3 Single compound wedge W_1

图3表示单组复合光楔 W_1 的结构,当光楔楔角为 ξ 、波长为 λ 、晶体双折射率为 Δn 时,在沿狭缝方向偏移量为 x 处,单组复合光楔的位相延迟 ϕ_1 可表示为

$$\phi_1 = \phi_{1-2} - \phi_{1-1} = \frac{2\pi\Delta n \left(\frac{l}{2} + x\right) \tan \xi}{\lambda} - \frac{2\pi\Delta n \left(\frac{l}{2} - x\right) \tan \xi}{\lambda} = \frac{4\pi\Delta n \cdot x \tan \xi}{\lambda} \quad (1)$$

式中, ϕ_{1-1} 是单光楔 W_{1-1} 的相位延迟量, ϕ_{1-2} 是单光楔 W_{1-2} 的相位延迟量.

消色差光楔 W_1 和 W_2 分别是两种双折射晶体材料,复合光楔的总延迟量由两部分组成,即

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 = \frac{4\pi\Delta n_1 \cdot x \cdot \tan \xi_1}{\lambda} + \frac{4\pi\Delta n_2 \cdot x \cdot \tan \xi_2}{\lambda} \quad (2)$$

式中, $\Delta n_1 = n_{o1} - n_{e1}$ 是复合单光楔 W_1 晶体的双折射率, $\Delta n_2 = n_{o2} - n_{e2}$ 是复合单光楔 W_2 晶体的双折射率, n_{o1} 表示 W_1 晶体寻常光的折射率, n_{e1} 表示 W_1 晶体非常光的折射率, n_{o2} 表示 W_2 晶体寻常光的折射率, n_{e2} 表示 W_2 晶体非常光的折射率, ξ_1 和 ξ_2 分别是复合单光楔 W_1 和复合单光楔 W_2 的楔角.

由式(2)可知,延迟量与波长 λ 、双折射率 Δn 、狭缝偏移量 x 和楔角 ξ 相关.楔角 ξ 是变量,不同光楔的楔角互不相关;狭缝偏移量 x 由光路实际情况决定;不同晶体的双折射率 Δn 不同,且随波长变化而变化.为了实现消色差的目的,比较不同双折射晶体的组合和楔角并择优,以减小总相位延迟量对波长的敏感度.

将复合光楔的总延迟量 ϕ 对波长 λ 求导,得到式(3),如果 $d\phi/d\lambda$ 趋向 0,证明延迟量对波长不敏感.

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{4\pi x (\Delta n'_1 \tan \xi_1 + \Delta n'_2 \tan \xi_2) + 4\pi x (\Delta n_1 \tan \xi_1 + \Delta n_2 \tan \xi_2)}{\lambda^2} \rightarrow 0 \quad (3)$$

2 消色差组合设计

目前常用的制作复合光楔的双折射晶体材料是 KDP,氟化镁(MgF₂),蓝宝石(Sapphire),石英(Quartz)和方解石(Calcite),由于蓝宝石加工成本大且不易加工,所以选取 KDP,氟化镁,石英和方解石四种材料进行选择设计,其中氟化镁和石英是正单轴性晶体, KDP 和方解石是负单轴性晶体,文献[11-14]分别给出这四种晶体的色散方程.

2.1 楔角选择

式(3)中,有 λ , $\Delta n'$, Δn , ξ_1 和 ξ_2 五个变量, $\Delta n'$, Δn 随波长 λ 变化而变化,其他三个变量互不关联,为了方便光楔楔角加工以及实验需求,假定 ξ_1 , ξ_2 有倍数关系且约束 ξ_1 , ξ_2 的范围是 $1^\circ \leq \xi_1, \xi_2 \leq 6^\circ$,通过 $d\phi/d\lambda - \xi_1$ 的关系曲线确定最优的 ξ_1 ,进而确定 ξ_2 .为了实现消色差目的,需要两种不同的双折射晶体组合,假定楔角 ξ_1 , ξ_2 的倍数关系为 $\xi_2 = X\xi_1$,双折射晶体六种组合及楔角关系 X 值见表1,表中 ξ_1 , ξ_2 分别是复合单光楔 W_1 和复合单光楔 W_2 的楔角,在 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ 波段,将上述双折射光楔的色散方程带入到式(3)中,可以得到,六种组合的 $d\phi/d\lambda - \xi_1$ 二维曲线关系图.

表1 复合光楔消色差组合及其楔角

Table 1 Combo wedge achromatic combination and wedge angle

Number	Crystal 1	Crystal 2	Value of X of $\xi_2 = X\xi_1$
1	KDP	Calcite	0.5;1;1.5;2;2.5;3
2	KDP	MgF ₂	0.5;1;1.5;2;2.5;3
3	KDP	Quartz	0.5;1;1.5;2;2.5;3
4	Calcite	MgF ₂	0.5;1;1.5;2;2.5;3
5	Calcite	Quartz	0.5;1;1.5;2;2.5;3
6	MgF ₂	Quartz	0.5;1;1.5;2;2.5;3

以 KDP-石英组合为例,图4表明 $d\phi/d\lambda$ 与 ξ_1 呈线性关系, ξ_1 , ξ_2 关系一定的情况下, $d\phi/d\lambda$ 随 ξ_1 的增大而增大;复合单光楔 W_1 的楔角 ξ_1 确定的情况下, W_2 的楔角 ξ_2 越小, $d\phi/d\lambda$ 的值也越大.

因此 KDP-石英组合楔角关系为 $\xi_2 = 3\xi_1$,且当 ξ_1 最小时, $d\phi/d\lambda$ 值最接近 0 值,即 KDP-石英组合为楔角 2° 的 KDP 加楔角 6° 的石英时,消色差效果最好.其余组合结果与 KDP-石英组合类似, $d\phi/d\lambda$ 与 ξ_1 呈线性关系,但 $d\phi/d\lambda$ 随 ξ_1 的变化关系不完全相同,在此不再赘述,对表1中六个组合的总结如为:负单轴性晶体-负单轴性晶体的组合和正单轴性晶体-正单轴性晶体的组合的最优楔角关系为 $\xi_2 = 0.5\xi_1$,正单轴性晶体-负

单轴性晶体的组合的最优楔角关系为 $\xi_2 = 3\xi_1$, 且当 ξ_1 最小时, $d\phi/d\lambda$ 值最接近 0 值.

2.2 材料选择

将六种最优楔角的组合以及实验中使用的楔角为 3° 的石英和楔角为 6° 的石英复合双光楔, 在 MATLAB 上绘制延迟量-波长和 $d\phi/d\lambda$ -波长曲线, 图 5 表示七种组合的延迟量-波长关系, 所有组合的延迟量随波长的增大而减小, 曲线越平缓表明延迟量对波长的依赖越小, 通过数据计算各组合的 $d\phi/d\lambda$, 即根据图 5 的数据计算曲线的斜率(规定 λ 范围是 $0.38 \mu\text{m} \sim 0.7 \mu\text{m}$), 结果在表 2 中, 得到的 $d\phi/d\lambda$ 数值小于石英和石英的消色差组合是 KDP-氟化镁, KDP-石英, 氟化镁-石英这三种组合.

图 6 表示七种组合的 $d\phi/d\lambda$ -波长关系曲线, 由上述理论可知 $d\phi/d\lambda$ 值越接近零值, 则延迟量对波长越不敏感, 因此从图中看出 KDP-石英组合和 KDP-氟化镁组合均比石英-石英组合更稳定地接近零值, 氟化镁-石英组合在短波段 $0.38 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.42 \mu\text{m}$ 的值 $d\phi/d\lambda$ 大于石英-石英组合, 不能在设计波段内达到消色差效果完全优于石英-石英组合. 通过图 5 和图 6 的分析可以得到 KDP-氟化镁, KDP-石英两种组合的消色差效果优于石英-石英.

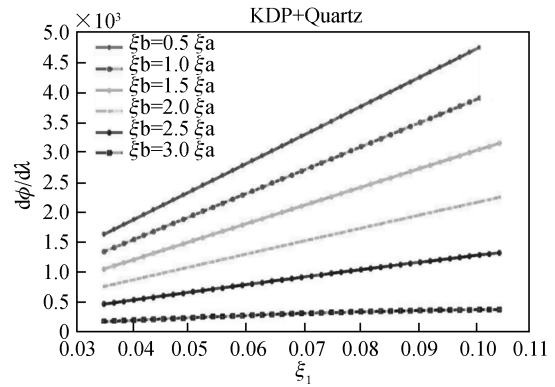


图 4 KDP-石英组合 $d\phi/d\lambda$ - ξ_1 二维曲线
Fig. 4 $d\phi/d\lambda$ - ξ_1 two-dimensional curve of KDP- Quartz combination

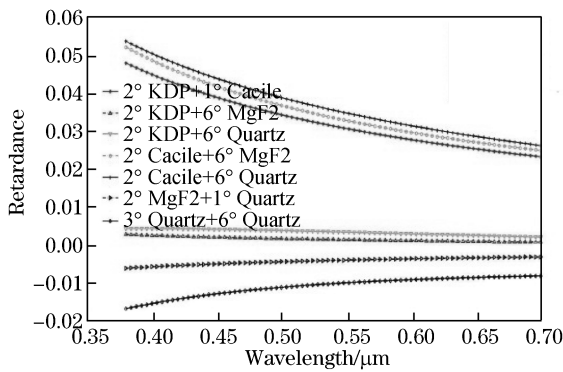


图 5 双折射晶体消色差组合的延迟量-波长变化曲线
Fig. 5 Retardance-wavelength variation curve of birefringent crystal achromatic combination

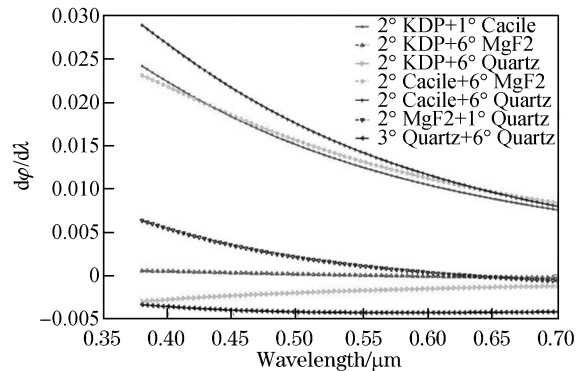


图 6 双折射晶体消色差组合的 $d\phi/d\lambda$ -波长变化曲线
Fig. 6 $d\phi/d\lambda$ -wavelength variation curve of birefringent crystal achromatic combination

表 2 双折射晶体消色差组合的 $d\phi/d\lambda$ 数值

Table 2 Value of $d\phi/d\lambda$ of birefringent crystal achromatic combination

Number	Crystal 1	Crystal 2	Value of $d\phi/d\lambda$ of achromatic combination
1	KDP of 2° wedge angle	Calcite of 1° wedge angle	0.063 3
2	KDP of 2° wedge angle	Mgf ₂ of 6° wedge angle	0.005 83
3	KDP of 2° wedge angle	Quartz of 6° wedge angle	0.008 33
4	Calcite of 2° wedge angle	Mgf ₂ of 6° wedge angle	0.06 83
5	Calcite of 2° wedge angle	Quartz of 6° wedge angle	0.071 7
6	Mgf ₂ of 2° wedge angle	Quartz of 1° wedge angle	0.009 38
7	Quartz of 3° wedge angle	Quartz of 6° wedge angle	0.019 17

3 实验结果与分析

理论研究得到两种较好消色差组合, 选取其中一种, 楔角 2° KDP-楔角 6° 石英组合进行实验验证, 将实验结果与早前实验室研究的楔角 3° 石英-楔角 6° 石英组合进行数据及图像对比.

由于 KDP-石英组合是具有双折射符号相反的不同材料构成, 即正单轴性晶体和负单轴性晶体, 两

个晶体的非寻常轴必须是平行的^[15],为了满足空间振幅调制光谱偏振测量系统单次测量就能获取全部的斯托克斯参量,因此楔角 2°KDP-楔角 6°石英的消色差光楔组合,需要四个复合光楔,如图 7 所示.采用如图 8 的实验平台装置对楔角 2°KDP-楔角 6°石英消色差组合实验.狭缝高度为 3 mm,检偏器方位角为 45°,准直和聚焦镜头采用佳能的 EF50 mm f/1.4 USM,透射光栅为 600 pl/mm,探测器是 DALSA 的 1M30 相机.

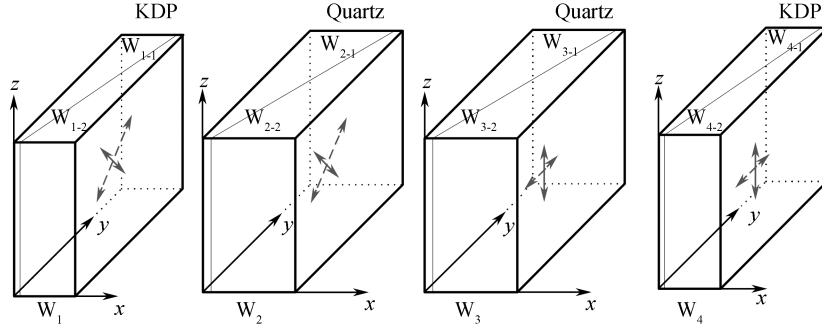


图 7 KDP-石英消色差光楔实验组合

Fig.7 Experiment combination with KDP-quartz achromatic wedge

实验图像如图 9 所示,随着波长增加,条纹呈发散状;在 $x=0$ 处, $\phi=0$,零级条纹平行,图 9(a)与图 9(b)的差别在于条纹的倾斜度不同,但肉眼无法识别.为了验证消色差效果,利用 Stellaimage 软件分别截取图 9 中 KDP-石英和石英-石英组合的零级亮条纹($x=0$)和一级亮条纹的十个点坐标,绘制出 $x-\lambda$ (λ 的范围是 510 nm~610 nm)的图线,并对点折线图进行线性拟合.

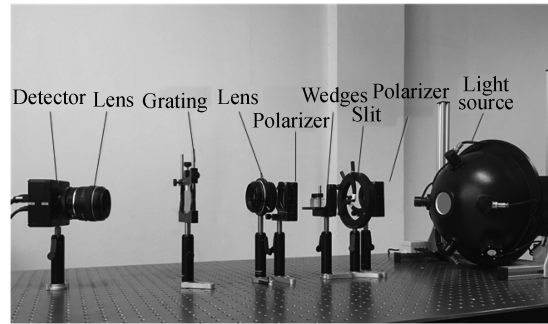
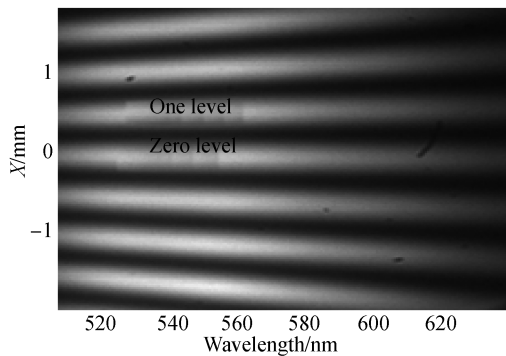
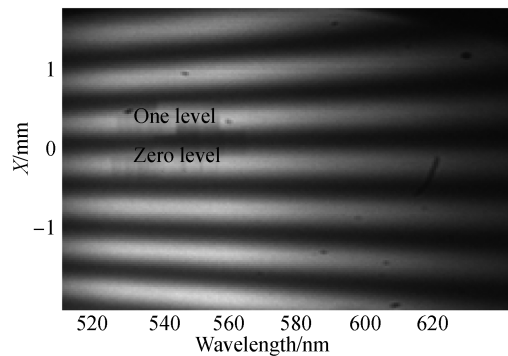


图 8 实验装置

Fig.8 Experimental facility



(a) KDP with wedge angle 2° - Quartz with wedge angle 6°



(b) Quartz with wedge angle 3° - Quartz with wedge angle 6°

图 9 实验图像

Fig.9 Experimental image

图 10 为 KDP-石英和石英-石英组合消色差特性对比图,根据拟合数据得到 KDP-石英组合的零级亮条纹和一级亮条纹的条纹“斜率” x/λ 数值是 0.001 2,石英-石英组合的零级亮条纹和一级亮条纹的条纹“斜率” x/λ 数值是 0.002 9,代入公式(3),计算 KDP-石英组合的一级亮条纹的延迟量对波长的一阶导数 $d\phi/d\lambda$ 是 0.007 395,石英-石英组合的一级亮条纹的 $d\phi/d\lambda$ 是 0.020 3,与表 2 中的理论数值一致,证明 KDP-石英复合光楔组合的消色差效果优于石英-石英复合光楔组合.在空间振幅调制光谱偏振测量系统中应用 KDP-石英复合光楔组合能减小条纹周期,增加探测器采样的条纹数,增大系统采样能力.

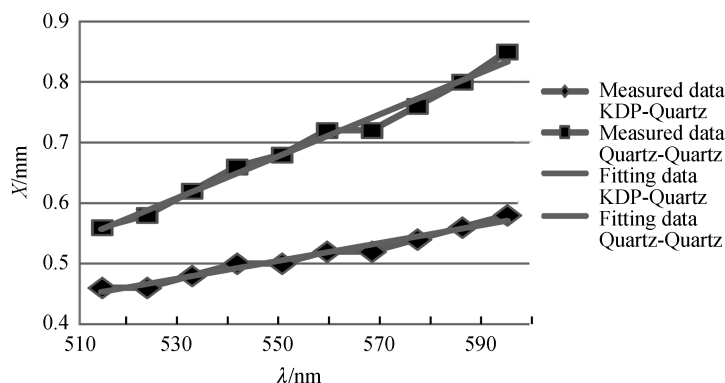


图 10 KDP-石英和石英-石英组合消色差特性对比

Fig.10 Comparison of achromatic characteristics of KDP-quartz and quartz-quartz combinations

4 结论

文章通过分析双复合光楔消色差组合相位延迟量的一阶导数和不同组合楔角的变化关系,拟合最优楔角的双复合光楔消色差组合的相位延迟量和波长的关系曲线,寻得两种消色差效果优于同种材料组成的双复合双光楔的组合方式;通过实验对比验证 KDP-石英和石英-石英复合光楔组合的消色差特性.实验发现 KDP-石英组合的一级亮条纹的相位延迟量对波长的一阶导数数值是 0.007 395,石英-石英组合的一级亮条纹的相位延迟量对波长的一阶导数数值是 0.020 3,KDP-石英组合消色差效果优于石英-石英组合,将该研究成果应用于空间振幅调制光谱偏振测量系统可以有效减少色差的影响,增大采样能力.

参考文献

- [1] ANTHONY D, OLEGD. Space-based remote sensing of atmospheric aerosols; the multi-angle spectro-polarimetric frontier[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, **145**(3): 85-116.
- [2] ZHAO Yong-qiang, ZHANG Lei, PAN Quan. Spectropolarimetric imaging for pathological analysis of skin[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(10): D236-D246.
- [3] HIROKIMI S, HIROHISA K, KOHZO H, *et al.* Earth observation system incorporating an LCTF spectropolarimeter [C]. SPIE, 2003, **4881**(2): 503-510.
- [4] NEELAM G, DENNIS R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(14): 2632-2637.
- [5] MARTIN P, CORALIE N, PERNELLE B. *et al.* Static spectropolarimeter concept adapted to space conditions and wide spectrum constraints[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(24): 7377-7386.
- [6] CAO Qi-zhi, ZHANG Jing, EDWARD D, *et al.* Static subminiature snapshot imaging polarimeter using spatial modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(5): 23-34.
曹奇志,张晶,Edward D,等.空间调制稳态微型快拍成像测偏技术研究[J].物理学报,2016,**65**(5):23-34.
- [7] MICHAEL W. KUDENOV. White-light channeled imaging polarimeter using broadband polarization gratings [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(15): 2283-2293.
- [8] OKA K, KANEKO T. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms[J]. *Optics Express*, 2003, **13**(11): 1510-1519.
- [9] WILLIAM S, THOMAS A, JOHN W, *et al.* Compact and robust method for full Stokes spectropolarimetry[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(22): 5495-5511.
- [10] ZHANG Wen-jing, SUN Yun-qiang. Phase characteristics of the collinear heterodyne interferometer system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4): 0414003.
张文静,孙运强.共线外差干涉系统相位特性[J].光子学报,2016,**45**(4):0414003.
- [11] <https://wenku.baidu.com/view/c9aa604e2b160b4e767fcffc.html>
- [12] CHEN Xi-yuan, SHAN Ming. Dispersion formula of calcite[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 38-42.
陈西园,单明.方解石晶体色散方程的研究[J].光电工程,2007,**34**(5):38-42.
- [13] ZHAO Shuang, WU Fu-quan. The study on dispersive equation and thermal refractive index coefficient of quartz crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(8): 1183-1186.
赵爽,吴福全.石英晶体的色散方程及折射率温度系数[J].光子学报,2006,**35**(8):1183-1186.
- [14] HALE P, DAY G. Stability of birefringent linear retarders (waveplates)[J]. *Applied Optics*, 1988, **27**(24): 5146-5153.
- [15] FRANS S, THEODORA K. Spectral modulation for full linear polarimetry[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(7): 1337-1346.