

星载成像光谱仪退偏器的设计及测试

毛靖华^{1,2}, 王咏梅^{1,2}, 石恩涛¹, 张仲谋¹, 王英鉴¹, 江 芳¹

¹中国科学院国家空间科学中心空间环境探测研究室, 北京 100190;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为保证星载成像光谱仪测量结果的准确性, 设计了双巴比涅退偏器。首先利用电磁波理论及光波传输理论分析了双巴比涅退偏器的工作原理, 接着根据偏振光在双折射晶体中的传播公式设计出适当的该退偏器的楔角, 最后搭建一套偏振测试装置, 对研制完成的双巴比涅退偏器的退偏性能进行测试。测试结果表明: 该双巴比涅退偏器在 $-15\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 入射角范围内具有较好的退偏性能。退偏器楔角选择 6° 时, 能在不影响成像质量的前提下较好地探测波段退偏, 且退偏度不受方位角及频率的影响, 退偏度优于 99%。该退偏器具有退偏度高、透射比高、性能稳定、体积小等优点。由于测量系统误差, 测量不确定度为 0.00290。

关键词 光学器件; 伪退偏; 双巴比涅退偏器; 波动方程; 星载成像光谱仪; 退偏度

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0423001

Design and Test of Depolarizer for Space-Borne Imaging Spectrometer

Mao Jinghua^{1,2}, Wang Yongmei^{1,2}, Shi Entao¹,
Zhang Zhongmou¹, Wang Yingjian¹, Jiang Fang¹

¹Department of Space Environment, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To guarantee the measurement accuracy of the space-borne imaging spectrometer, the dual Babinet compensator pseudo-depolarizer (DBCP) is designed. The principle of the DBCP is analyzed by utilizing the electromagnetic wave theory and light wave transmission theory, and a suitable wedge angle of the DBCP is schemed out based on the formula of polarized light propagation in birefringent crystal. The depolarization performance of the DBCP is worked out with a set-up polarization testing device. The results show that the DBCP has a better depolarization performance within the incidence angle range of $-15\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. When the wedge angle is 6° , the depolarizer can realize depolarization at detection band with degree of depolarization better than 99%. Which is independent of the azimuth angle and frequency, and without affecting the imaging quality. Furthermore, the DBCP has many advantages, such as high degree of depolarization, high transmittance, stable performance and small volume. The uncertainty of measurement is 0.00290, because of the systems error.

Key words optical devices; pseudo-depolarization; dual Babinet compensator pseudo-depolarizer; wave equation; space-borne imaging spectrometer; degree of depolarization

OCIS codes 230.0040; 260.5430; 290.5855; 310.5448

1 引 言

环境问题是人类所面临的重大课题, 大气环境是环境遥感的热点。利用星载成像光谱仪进行大气参量遥感具有高精度、全球性、全天候性等特点, 已得到了广泛应用, 在大气对太阳后向散射辐射测量中, 大气散射辐射的偏振特性是影响大气遥感精度的重要因素^[1-6]。星载大气微量成分探测仪是以差分光学吸收光谱

收稿日期: 2016-11-18; **收到修改稿日期:** 2016-12-19

基金项目: 北京市科技委员会项目(Z151100003615001)

作者简介: 毛靖华(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事星载成像光谱仪地面定标技术方面的研究。E-mail: rennel230@126.com

导师简介: 王咏梅(1967—), 女, 博士, 研究员, 主要从事中高层大气、电离层光学遥感仪器研制和数据应用方面的研究。E-mail: wym@nssc.ac.cn(通信联系人)

法(DOAS)为探测原理的成像光谱仪。探测光谱范围为 300~500 nm,总视场为 112°,探测分为紫外和可见光双通道,光谱分辨率分别为 0.4 nm 和 0.6 nm,通过在卫星上探测太阳后向散射辐射,利用 DOAS 算法反演微量气体成分的分布和变化,以监测全球温室效应、臭氧层厚度变化和各种有害气体的排放等,从而实现我国对大气微量成分的全球探测。

非偏振的太阳光经过大气层散射后,由于大气分子和气溶胶的瑞利散射作用,散射光中电矢量垂直分量和平行分量的振幅发生变化,不再是各向同性的自然光,而成为偏振光或部分偏振光。用于空间遥感探测的成像光谱仪通常是偏振敏感的光学系统,这些系统的主要任务是准确测量大气光谱辐亮度,由于光谱仪中含有光栅、反射镜等偏振敏感元件,光学系统效率会随入射辐射的偏振特性而异。为了减小入射辐射偏振特性对测量的影响,目前有两种解决方法:一是测量入射光的偏振特性,通过地面定标和数据处理,对仪器的偏振特性进行校正,这样处理的方法工作量很大,而精确测量入射光的偏振特性也十分困难;二是采用退偏器对入射辐射进行退偏,这是当前在光学遥感器上普遍采用的方法。退偏器^[7-11]通常利用冰洲石、石英等晶体的双折射特性实现光在空域或频域的退偏,具有退偏度高、透射比高、性能稳定、体积小等优点,被广泛应用于高性能的光学系统中。另外,任何偏振光通过双折射材料都不可能转化为真正意义上的非偏振光,而是大量不同偏振态在空域或者频域内的平均测量效果,故晶体双折射退偏器属于伪退偏器的一种。

星载大气微量成分探测仪光谱覆盖范围较宽,分为紫外和可见光通道,且两通道有不同的光谱分辨率要求,如果采用频域退偏器^[12],则需用两个退偏器分别对其退偏,若采用空域退偏^[13]的方法,则两个通道可共用一个退偏器。因此星载大气微量成分探测仪采用空间退偏器的方案,该退偏器为双巴比涅退偏器(DBCP),由两块光轴相互成 45°角放置的巴比涅补偿器组成,退偏器采用石英晶体材料,表面镀 MgF₂ 增透膜,保证在载荷所探测的波段范围内具有良好的透过特性。本文首先分析了用于星载大气微量成分探测仪的退偏器的工作原理及退偏性能,然后对双巴比涅退偏器的退偏特性进行测试,测试结果表明双巴比涅退偏器具有理想的退偏性能,且退偏度不受频率、方位角及入射角影响,具有退偏度高、透射比高、性能稳定、体积小等优点,可以满足大气微量成分探测的需求。

2 基本原理

2.1 双巴比涅退偏器的工作原理

双巴比涅退偏器的结构如图 1 所示,该退偏器采用石英晶体材料,由两个相同的巴比涅补偿器胶合而成,为减小退偏器的尺寸,将退偏器放在望远镜的入瞳前,有效口径为 8 mm,总厚度约 14 mm。每个补偿器包括两个光轴相互垂直的石英晶楔,其中右侧补偿器的晶体光轴相对于左侧的绕 z 轴旋转 45°。两块巴比涅补偿器胶合而成,序号为 1~4 的晶体光轴分布如图 2 所示。定义入射线偏振光 L 的振动方向与晶体 1 的光轴夹角为方位角 θ 。建立笛卡尔坐标系, y 轴与退偏器的第一块晶体的光轴平行, z 轴垂直于第一块晶体表面且通过晶体表面中心。

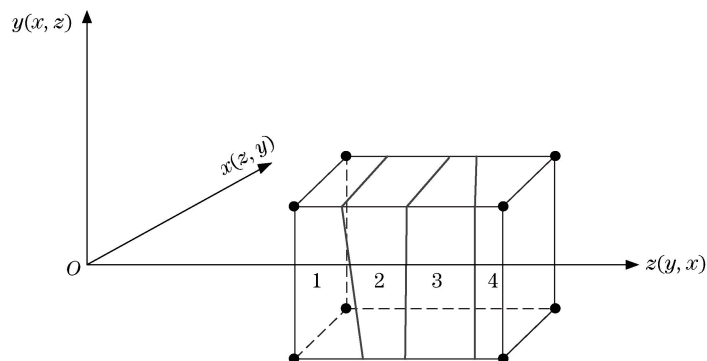


图 1 双巴比涅退偏器结构图

Fig. 1 Structure chart of DBCP

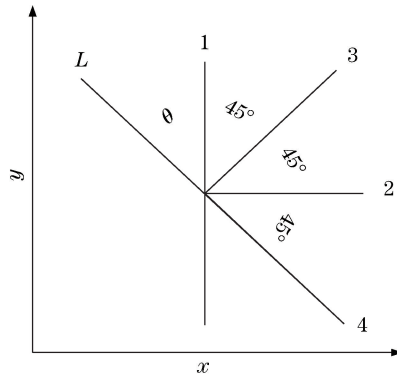


图 2 4 块晶体光轴分布图

Fig. 2 Optical axis distribution map of four crystals

以退偏器透射端寻常光(o光)、非寻常光(e光)的振动方向为两个本征方向,将光线在这两个方向分解,根据线偏振光在晶体内的传播特性及电磁波理论,分别计算得到本征方向透射光的振幅及相位,最后利用光波叠加原理得到透射光总的合振动强度及相位差,并计算出退偏器的退偏度。取 z 轴正方向为光线正入射方向, z = z₀ 为透射光接收屏,根据平面电磁波理论^[14],空间中沿 k 传播的平面波的表达式为

$$u(x, y, z) = A \exp[-ik(x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma)], \quad (1)$$

式中 k 为传播矢量,方向为 (cos α, cos β, cos γ), cos α, cos β, cos γ 分别为方向余弦。

$$\phi(x, y, z) = k \cdot (x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma), \quad (2)$$

式中 φ(x, y, z) 为相位,其中波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为波长。

由于石英材料巴比涅补偿器的特性^[15-16],一束振动方向为任意方位角 θ (θ ≠ 0° 或 90°) 的线偏振光正入射晶体后被分成 4 束线偏振光,4 束透射光端点分布在一个菱形的四个顶点,对称分布在新坐标系 x₁Oy₁ 的两个坐标轴上,如图 3 所示。

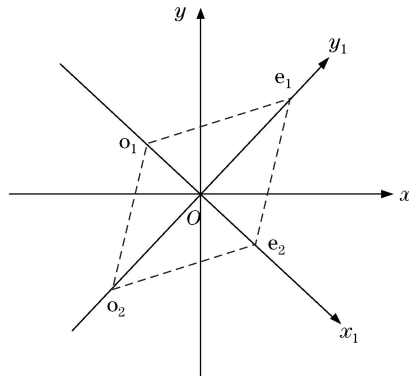


图 3 透射光斑在光屏上的分布图

Fig. 3 Distribution of transmission spot on the screen

在新坐标系下,由于 4 束透射光在退偏器内的光程几乎相同,因此它们在接收屏处的相位分别为

$$\begin{cases} \varphi_{e_1} = \frac{2\pi}{\lambda}(y_1 \cos \beta + z_0 \cos \gamma) \\ \varphi_{e_2} = \frac{2\pi}{\lambda}(x_1 \cos \alpha + z_0 \cos \gamma) \\ \varphi_{o_1} = \frac{2\pi}{\lambda}(-x_1 \cos \alpha + z_0 \cos \gamma) \\ \varphi_{o_2} = \frac{2\pi}{\lambda}(-y_1 \cos \beta + z_0 \cos \gamma) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 λ 为光在真空中的波长,α、β、γ 分别为透射光与 x₁ 轴、y₁ 轴、z 轴的夹角。假设入射光的振幅为 A₀,两

块巴比涅补偿器晶轴夹角为 45° , 忽略各透射光在传播过程中能量的微弱损失, 可得透射光的振幅分别为

$$\begin{cases} A_{e_1} = A_0 \sin \theta \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin \theta \\ A_{e_2} = A_0 \cos \theta \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} A \cos \theta \\ A_{o_1} = A_0 \sin \theta \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin \theta \\ A_{o_2} = A_0 \cos \theta \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} A \cos \theta \end{cases}, \quad (4)$$

由(4)式可以看出, 4束透射光的频率相同, 振幅和相位不同。令它们两两组合分别叠加: e_1 和 e_2 的振动方向相同, 合成的光用 e 来表示; o_1 和 o_2 的振动方向相同, 合成的光用 o 来表示。

根据光波叠加理论, 频率和振动方向相同的两束光波的合振动振幅及相位计算公式分别为

$$\begin{cases} A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ \tan \varphi = \frac{a_1 \sin \varphi_1 + a_2 \sin \varphi_2}{a_1 \cos \varphi_1 + a_2 \cos \varphi_2} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 a_1, a_2 为分振动振幅, φ_1, φ_2 为分振动相位, A 为合振动振幅, φ 为合振动相位。将(3)式和(4)式代入(5)式中, 可分别得到合成的 o 光与 e 光的振幅及相位, 即

$$\begin{cases} A_e^2 = \frac{A_0^2}{2} \left[1 + \sin 2\theta \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 \cos \alpha - y_1 \cos \beta) \right] \\ A_o^2 = \frac{A_0^2}{2} \left[1 + \sin 2\theta \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 \cos \alpha - y_1 \cos \beta) \right] \\ \tan \varphi_e = \frac{\sin \theta \sin \varphi_{e_1} + \cos \theta \sin \varphi_{e_2}}{\sin \theta \cos \varphi_{e_1} + \cos \theta \cos \varphi_{e_2}} \\ \tan \varphi_o = \frac{\sin \theta \sin \varphi_{o_1} + \cos \theta \sin \varphi_{o_2}}{\sin \theta \cos \varphi_{o_1} + \cos \theta \cos \varphi_{o_2}} \end{cases}, \quad (6)$$

因此 4束光线叠加得到的总的光强度为

$$A^2 = A_0^2 \left[1 + \sin 2\theta \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 \cos \alpha - y_1 \cos \beta) \right], \quad (7)$$

利用正切公式得到两者的相位差, 即

$$\varphi_e - \varphi_o = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 \cos \alpha + y_1 \cos \beta), \quad (8)$$

由(8)式可知, 透射光为沿与直线 $x_1 \cos \alpha + y_1 \cos \beta = 0$ 平行的方向连续变化的椭圆偏振光, 偏振态沿 x_1 和 y_1 均有变化。

影响空间伪退偏器退偏效果的是相位差的空间变化率, 空间变化率与楔角大小密切相关, 因此, 利用该晶体对星载成像光谱仪退偏时, 要选择适当大的楔角。

2.2 双巴比涅退偏器楔角的选择

楔角 ω 主要使得在使用的有效通光孔径内偏振态的变化具有一定的周期, 这又主要取决于有效通光孔径对应晶体厚度的变化。用 Δd 表示厚度的变化, 用 Φ 表示有效通光孔径, 那么有

$$\begin{cases} \Delta d = \Phi \tan \omega \\ \Delta \delta = \pm [2\pi \Phi (n_e - n_o) \tan \omega] / \lambda \end{cases}, \quad (9)$$

式中 n_e 为 e 光折射率, n_o 为 o 光折射率, $\Delta \delta$ 为偏振态变化周期数, λ 为波长。根据大气微量成分探测仪光学设计, 取退偏器有效口径 $\Phi = 8 \text{ mm}$, 最长波长为 505 nm , $n_e - n_o = 0.0092$; 设 $\Delta \delta = \pi$ 为偏振态变化的一个周期, 则一个周期对应的楔角 ω 为 0.196° 。当 $\omega = 6^\circ$ 时, 对于 505 nm 、 $\Phi = 8 \text{ mm}$ 的有效通光孔径内偏振态的变化有 30.6 个周期, 且周期数随波长的减小而增加。在有效通光孔径内, 偏振态的变化的周期数越多越好, 从

(9)式可以看出,楔角越大时,空间变化率越大,但过大的楔角会使透过光束的发散角变大,影响成像质量,综合考虑大气微量成分探测仪光学设计,选取楔角为 6° 。

2.3 双巴比涅型空间退偏器引起的像质变化

星载大气微量成分探测仪的入射狭缝宽度为 0.36 mm ,空间分辨率为 $1^\circ \times 1.7^\circ$ (沿轨 \times 跨轨),当光线入射在双巴比涅型空间退偏器上时,由于巴比涅补偿器的交界面为斜面,此界面上不同的折射率会使 o 光、 e 光的传播方向分开。当双巴比涅型空间退偏器放置在准直光束中时,仅引起准直光束混合,不会产生进一步的像差;但当双巴比涅型空间退偏器放置在会聚光束中时,光束通过退偏器后将分别向上和向下偏转一个角度,且向上和向下偏转的角度基本相等,约为

$$\gamma = \Delta n \cdot \omega, \quad (10)$$

式中 ω 为巴比涅补偿器的楔角, Δn 为折射率之差, γ 为偏转角。当 ω 为 6° 时,偏转角 $\gamma = 0.06^\circ$ 。当光学系统的有效焦距为 E_{FL} 时,会聚光束成像点的偏离为

$$s = E_{FL} \cdot \tan(2\gamma)。 \quad (11)$$

星载大气微量成分探测仪的退偏器放在光谱仪狭缝前,直接影响光谱仪狭缝上成像的大小。星载大气微量成分探测仪望远镜的有效焦距 $E_{FL} = 26.03\text{ mm}$,即 $s = 0.054\text{ mm}$,约为狭缝宽度的 $1/6.7$ 、瞬时视场的 $1/94$,由此导致沿轨方向空间分辨率稍有降低(约降低 15%)。由于在设计中仪器沿轨方向瞬时视场为 0.8° ,即使降低 15% ,也可满足飞行方向 1° 瞬时视场的要求,因此设计的双巴比涅型空间退偏器可应用于星载大气微量成分探测仪。

2.4 双巴比涅退偏器的退偏度分析

由(6)式可以看出,透射光的振动强度在两个本征方向上相同,因此合成的椭圆偏振光的主轴方向不随相位差变化,图4为光线合成示意图。

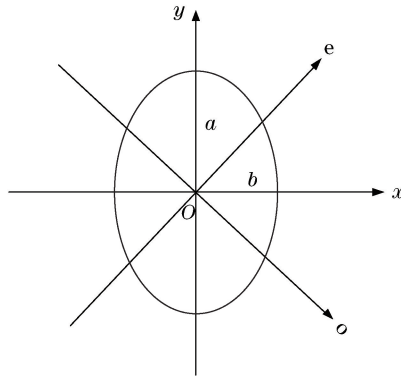


图4 椭圆偏振合成示意图

Fig. 4 Diagram of elliptical polarization compound

由相关计算公式^[17]可以得出,透射光合成的椭圆偏振光的主轴 a^2 和 b^2 分别为

$$\begin{cases} a^2 = \frac{A_0^2}{2} [1 + \sin 2\theta \cos 2\pi(x_1 \cos \alpha - y_1 \cos \beta) / \lambda] [1 + \cos 2\pi(x_1 \cos \alpha + y_1 \cos \beta) / \lambda] \\ b^2 = \frac{A_0^2}{2} [1 + \sin 2\theta \cos 2\pi(x_1 \cos \alpha - y_1 \cos \beta) / \lambda] [1 - \cos 2\pi(x_1 \cos \alpha + y_1 \cos \beta) / \lambda] \end{cases}, \quad (12)$$

令 $\Omega_1 = 2\pi x_1 \cos \alpha / \lambda$ 、 $\Omega_2 = 2\pi y_1 \cos \beta / \lambda$,从而得出双巴比涅退偏器在一个周期的透射光光强的最大值和最小值,即

$$\begin{cases} I_{\min} = \iint_0^{2\pi} \frac{A_0^2}{2} [1 + \sin 2\theta \cos(\Omega_1 - \Omega_2)] [1 + \cos(\Omega_1 + \Omega_2)] d\Omega_1 d\Omega_2 \\ I_{\max} = \iint_0^{2\pi} \frac{A_0^2}{2} [1 + \sin 2\theta \cos(\Omega_1 - \Omega_2)] [1 - \cos(\Omega_1 + \Omega_2)] d\Omega_1 d\Omega_2 \end{cases}, \quad (13)$$

式中 I_{\max} 为透射光最大值, I_{\min} 为透射光最小值。根据定义,剩余偏振度为

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (14)$$

将(13)式代入(14)式可得出,退偏器透射光的剩余偏振度 $P=0$ 。因此双巴比涅退偏器在理论上具有理想的退偏性能,且退偏度不受频率、方位角及相位差影响,可应用于星载大气微量成分探测仪的退偏系统。

3 实验结果及分析

3.1 实验的过程

星载大气微量成分探测仪光谱覆盖范围为 300~500 nm,要求退偏器对探测范围内的所有波段都有良好的退偏特性,用石英晶体制作了双巴比涅退偏器空域退偏器:楔角为 6° ,厚度约为 14 mm,有效口径为 $\phi 8$ mm。实验装置示意图如图 5 所示,A 为氙灯、B 为氙灯准直光路、C 为可调光阑、D 为窄带滤光片、E 为起偏器、F 为双巴比涅退偏器及二维转台、G 为检偏器、H 为光电探测系统。

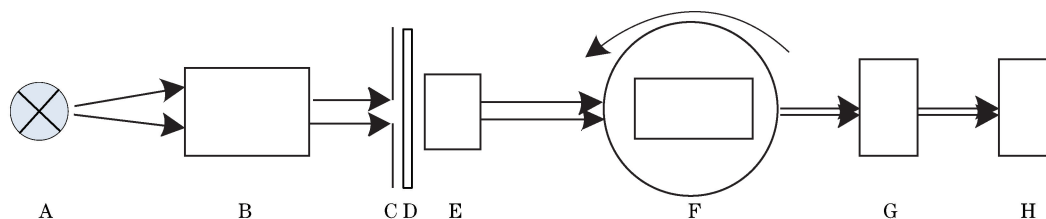


图 5 偏振实验装置示意图

Fig. 5 Experiment device diagram of polarization

实验装置的光源选用日本浜松公司生产的超静氙灯,可产生 200~1000 nm 的连续光谱,光源稳定性为 0.2%;起偏器选用格兰-泰勒棱镜,检偏器选用格兰-汤姆森棱镜,两者旋转可达到的角度精度为 0.1° ;二维转台精度为 0.01° ;光电探测系统包括硅光探测器和安捷伦生产的 34420A 7 位半数字多用表,数字多用表经中国科学计量研究院定标,100.0000 mV 量程时测量精度为 ± 0.0018 mV。

根据退偏器有效口径选择可调光阑口径大小,旋转起偏器到一个位置得到振动方位角为 θ 的线偏振光,旋转检偏器,使得光电探测器的输出计数随之连续变化,当检偏器旋转 360° 时,光功率出现两个极大值 I_{a1} 和 I_{a2} ,两个极小值 I_{b1} 和 I_{b2} ,即

$$\begin{cases} \bar{I}_{\max} = \frac{I_{a1} + I_{a2}}{2} \\ \bar{I}_{\min} = \frac{I_{b1} + I_{b2}}{2} \\ P = \frac{\bar{I}_{\max} - \bar{I}_{\min}}{\bar{I}_{\max} + \bar{I}_{\min}} \\ D = 1 - P \end{cases}, \quad (15)$$

按照(15)式计算,得到偏振光经过退偏器后的剩余偏振度 P 及退偏度 D 。

通过旋转转台,调节线偏振光至退偏器的入射角,测试在 $-15 \sim 15^\circ$ 入射角范围内,双巴比涅退偏器的退偏效果。

3.2 实验的结果与分析

为减小光源不稳定带来的误差,每个数据都要进行多次测量,并取其平均值来计算退偏度。表 1 为正入射时,双巴比涅退偏器对振动方向为不同方位角的 400 nm 线偏振光的退偏度测试结果。

表 1 正入射时不同方位角的 400 nm 线偏振光的退偏度

Table 1 Depolarization degree of 400 nm normal incidence linear polarized light with different azimuth angles

$\theta / (^\circ)$	0	15	30	45	60	75	90
$P / \%$	0.58	0.94	0.92	0.36	0.73	0.63	0.78
$D / \%$	99.42	99.06	99.08	99.64	99.27	99.37	99.22

从表 1 可以看出,经过双巴比涅退偏器后,不同方位角的线偏振光退偏度优于 99%,且基本不随方位角变化。

表 2 为方位角为 0° 、 45° 和 90° 时,不同入射角的 400 nm 线偏振光的退偏度。

表 2 不同入射角的 400 nm 线偏振光的退偏度

Table 2 Depolarization degree of 400 nm linear polarized light with different incidence angles

$i / (^\circ)$	$\theta / (^\circ)$	$P / \%$	$D / \%$
15	0	0.55	99.45
	45	0.44	99.56
	90	0.49	99.51
7.5	0	0.76	99.24
	45	0.34	99.66
	90	0.78	99.22
0	0	0.58	99.42
	45	0.36	99.64
	90	0.78	99.22
-7.5	0	0.29	99.71
	45	0.32	99.68
	90	0.69	99.31
-15	0	0.55	99.45
	45	0.52	99.48
	90	0.91	99.09

从表 2 可以看出,对振动方向不同的线偏振光,在 xoz 平面内改变光线入射角,退偏效果依然理想,且基本不随入射角变化,线偏振光的退偏度均优于 99%。

图 6 为方位角为 45° 时,正入射的不同频率线偏振光的剩余偏振度曲线。可以看出,对频率不同的线偏振光,退偏度优于 99%。

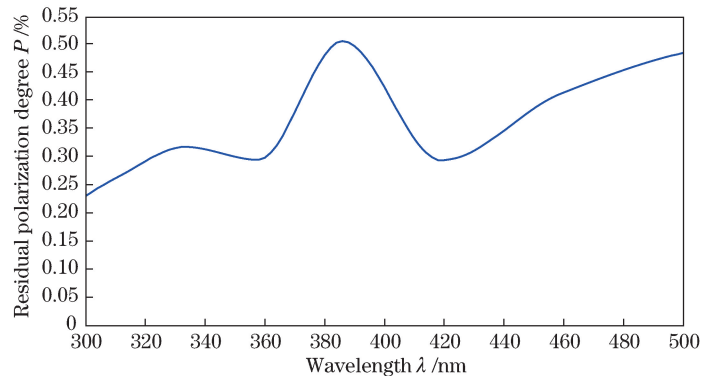


图 6 不同波长的剩余偏振度

Fig. 6 Residual polarization degree at different wavelengths

由表 1、表 2 和图 6 可以看出,双巴比涅空间型退偏器在一定入射角范围内具有良好的退偏性能,且退偏度不受方位角及频率的影响,可应用于星载大气微量成分探测仪的退偏系统。由于测试时不可避免有系统误差,使得退偏度 D 不等于其理论值 1,系统误差主要来源有三个方面,一是光源本身的稳定性,二是检偏器旋转时,由于不能保证光在检偏器的入射角保持一致而引起棱镜透射比的变化,三是光探测器的偏光灵敏度。系统误差用以下方法得到:测量光路中将起偏器与待测退偏器移出,旋转检偏器,应用(13)式计算出偏振度 P' 作为系统误差,计算得到 P' 为 0.00290。

4 结 论

本文研究了星载大气微量成分探测器退偏器的机理,并对该退偏器的性能进行测试。针对载荷宽探测波段、双通道探测的特性,选取两个晶轴夹角为 45° 的巴比涅补偿器,设计了双巴比涅空间型退偏器,并对退偏器的退偏性能进行了测试。结果表明:双巴比涅退偏器在一定入射角范围内具有较好的退偏性能,且退偏度不受方位角及频率的影响,退偏器楔角选择 6° 时,能在不影响成像质量的前提下较好地探测波段退偏,退偏度优于 99% ,具有退偏度高、透射比高、性能稳定、体积小等优点,可为后续星载大视场成像光谱仪的退偏工作积累经验。

致谢:感谢曲阜师范大学吴福全教授,在本课题研究过程中,吴教授给予了悉心的指导并协助完成测试。

参 考 文 献

- [1] Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of space-Borne hyperspectral imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010008.
王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010008.
- [2] Zhang Da, Zheng Yuquan. Hyperspectral remote sensing and its development and application review[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(3): 67-73.
张 达, 郑玉权. 高光谱遥感的发展与应用[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(3): 67-73.
- [3] Xue Qingsheng. Optical system design of multi-model hyperspectral imager for spaced-Based atmospheric remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822005.
薛庆生. 空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0822005.
- [4] Zhao Facai. The study on polarization correction of imaging spectrometer for space-borne ultraviolet atmospheric remote sensing[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 17-34.
赵发财. 空间紫外大气遥感成像光谱仪偏振校正研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 17-34.
- [5] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, *et al.* Analysis on impact of atmospheric refraction on radiative transfer process at visible and infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601005.
胡 帅, 高太长, 李 浩, 等. 大气折射对可见近红外波段辐射传输的影响分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601005.
- [6] Zhang Xiaolin. Linear depolarization ratios characteristics of dust aerosol particles model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0829001.
张小林. 沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比特性[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0829001.
- [7] Dobber M R, Dirksen R J, Levelt P F, *et al.* Ozone monitoring instrument calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1209-1238.
- [8] Yu J, Jiang H B, Yang H, *et al.* Depolarization of white light generated by femtosecond laser pulse in KDP crystals [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(6): 1566-1570.
- [9] Petrashen A G. Depolarization of radiation upon coherent excitation[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2010, 109(6): 829-832.
- [10] de Sande J C, Piquero G, Teijeiro C. Polarization changes at Lyot depolarizer output for different types of input beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(3): 278-284.
- [11] Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. Study on limb imaging spectrometer with grating dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1516-1521.
薛庆生, 王淑荣, 李福田. 光栅色散临边成像光谱仪的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1516-1521.
- [12] Zhao Facai, Wang Shurong, Qu Yi, *et al.* Design and analysis of a depolarizer for the space-borne grating imaging spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(7): 1991-1994.
赵发财, 王淑荣, 曲 艺, 等. 星载光栅成像光谱仪的退偏器设计与分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(7): 1991-1994.
- [13] Wang Lei. Design and study of a novel spatial pseudodepolarizer[J]. *Optical Technique*, 2014(3): 209-213.
王 磊. 一种新型空间伪退偏器的设计与研究[J]. *光学技术*, 2014(3): 209-213.
- [14] Liao Yanbiao. *Polarization optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 12-14.

- 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 12-14.
- [15] Chipman R A, Mcguire J P. Analysis of spatial pseudodepolarizers in imaging systems[J]. Optical Engineering, 1990, 29(12): 1478-1484.
- [16] Ren Shufeng. Crystal birefringence of depolarization wave superposition method and optimization design[D]. Shandong: Qufu Normal University, 2014: 48-49.
任树锋. 晶体双折射退偏器的光波叠加分析方法与优化设计[D]. 山东: 曲阜师范大学, 2014: 48-49.
- [17] Born M, Wolf E. Principles of optics[M]. YANG Jia sun Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 78-80.
马科思·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 杨葭荪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 78-80.