

光谱仪会聚光路中退偏器的设计方法

武志昆^{1,2,3,4}, 石恩涛^{1,3,4*}, 王咏梅^{1,2,3,4}, 郭宝泽^{1,2,3,4}, 李鹏达^{1,3,4}¹ 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;² 中国科学院大学, 北京 100049;³ 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190;⁴ 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190

摘要 为了降低光谱仪的偏振敏感度,提出了一种在会聚光路中设计退偏器的方法。该方法首先将系统的望远镜和准直镜视为辅助光路,使得光束的偏振状态可以用 Stocks 矢量来表示;然后使用 Mueller 矩阵来表示元件的偏振特性,并推导出了基于 Mueller 矩阵的系统偏振敏感度模型;最后利用多重多元回归分析来提升 Mueller 矩阵的计算速度与精度。基于该方法设计了一款放置在会聚光路中的改进型退偏器,系统的偏振敏感度小于 1%,像点分裂距离小于 8 μm ,该结果满足设计要求,验证了该方法在会聚光路中设计退偏器的有效性。

关键词 测量; 光谱仪; 偏振敏感度; 会聚光路; 退偏器

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1012001

Design Method of Depolarizer in Converging Optical Path of Spectrometer

Wu Zhikun^{1,2,3,4}, Shi Entao^{1,3,4*}, Wang Yongmei^{1,2,3,4}, Guo Baoze^{1,2,3,4}, Li Pengda^{1,3,4}¹ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China;⁴ Key Laboratory of Science and Technology on Space Environmental Situation Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract In order to reduce the polarization sensitivity of a spectrometer, a method of designing a depolarizer in convergent optical path is proposed. In this method, the telescope and collimator of the system are regarded as auxiliary optical paths, so that the polarization state of the beam can be expressed by Stocks vectors; then the polarization characteristic of the element is represented by Mueller matrix, and the polarization sensitivity model of the system based on Mueller matrix is derived; finally, multiple regression analysis is used to improve the calculation speed and accuracy of Mueller matrix. Based on this method, an improved depolarizer placed in the convergent optical path is designed. The polarization sensitivity of the system is less than 1%, and the image point splitting distance is less than 8 μm . The results meet the design requirements and verify the effectiveness of the method for designing the depolarizer in the convergent optical path.

Key words measurements; spectrometer; polarization sensitivity; converging optical path; depolarizer

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2021-11-28; 录用日期: 2021-12-13

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA1535010204)、国家重大项目风云三号气象卫星

通信作者: *set@nssc.ac.cn

1 引言

成像光谱仪广泛应用于空间光学探测领域,在大气痕量气体探测方面具有很高的应用价值。大气后向散射光具有较大的线偏振度^[1],因此要求测量仪器具有较低的偏振敏感度(PSG)。光谱仪中常用的反射镜和光栅是偏振敏感型光学元件,可提高系统的偏振敏感度,使测量精度受到严重影响^[2]。因此,需要在光栅之前的光路中安装退偏器,以降低光谱仪的偏振敏感度。

空间域退偏是常用的退偏方式之一,该类型的退偏器(相位补偿器)通常由楔形晶体组成^[3-4],可对光瞳中的光线进行不同程度的相位补偿,使出射光线之间的偏振状态存在明显差异,且使得光束的偏振度降低^[5]。通常,退偏器会被安装在望远镜前方,由于入射光为平行光束,因此关于退偏器的理论计算也多是基于平行光束进行的^[4-6]。然而,对于大孔径的系统而言,楔形晶体的厚度会随着孔径的增大而增大,楔形晶体的厚度的增加既降低了退偏器的透过率,又提高了造价,在这种情况下,退偏器更适合安装在望远镜的会聚光路中。会聚光线与晶体光轴之间的夹角各异,以平行光束入射的退偏器,其传统设计理论难以适用于会聚光束入射的退偏器。

基于会聚光线在晶体中的相位变化过程,本文提出了光谱仪会聚光路中退偏器的设计方法。首先使用 Jones 矩阵来表示光线的相位变化过程;再使用 Mueller 矩阵来表示光学元件的偏振特性,并建立了光谱仪偏振敏感度的计算模型;最后以偏振敏感度作为评价因子,优化得到最优的退偏器结构参数。

2 基本原理

2.1 光线的相位差变化

光线的偏振状态通常用 Jones 矩阵来表示^[2,7],坐标系中的 z 轴表示光线的传输方向,光线的偏振矢量 \mathbf{E} 可以表示为

$$\mathbf{E} = [E_x \quad E_y]^T = [a_x \exp(i\delta_x) \quad a_y \exp(i\delta_y)]^T, \quad (1)$$

式中:上标 T 代表转置符号; E_x 和 E_y 分别表示偏振光线在 x 方向和 y 方向上的电场强度分量; a_x 和 a_y 分别表示 E_x 和 E_y 的复振幅; δ_x 和 δ_y 分别表示 E_x 和 E_y 的相位。

对于平行光束,光线的传输方向一致,利用式(1)可以描述光束中任何一根光线的偏振状态。对于会聚光束,光线的传输方向不同,光线的偏振状态

无法统一描述。

透射式光谱仪所用的玻璃具有各向同性,不会引起光线的相位差发生变化,光谱仪中的望远镜和会聚镜可以作为退偏器的辅助元件。将望远镜、退偏器和会聚镜视作一个系统,系统中只有退偏器可以影响光线的相位差。系统的入射光和出射光均为平行光束,因此光束中光线的偏振状态可以用式(1)表示。

如图 1 所示,光线用实线来表示,其传输方向为 \mathbf{k} , \mathbf{c} 为晶体的光轴方向。光线通过望远镜 F1、退偏器 P 和准直镜 F2 后,其传输方向会发生多次偏折。为了方便描述光线在系统中的相位差变化,这里对每根光线都建立一个局部坐标系,光线的传输方向 \mathbf{k} 为局部坐标系的 z 轴。 \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k}_2 分别表示光线偏折前后的传输方向, θ 为光线绕旋转轴逆时针旋转的角度, \mathbf{a} 为光线旋转轴对应的单位矢量, $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3)$, \mathbf{a} 可以表示为

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{k}_1 \times \mathbf{k}_2}{\|\mathbf{k}_1 \times \mathbf{k}_2\|} = \frac{\mathbf{k}_1 \times \mathbf{k}_2}{|\sin \theta|}, \quad (2)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示矢量的模; $|\cdot|$ 表示绝对值。局部坐标系的坐标轴在全局坐标系中的方向矢量可以利用 Euler-Rodrigues 公式^[8]计算得到,其表达式为

$$[\mathbf{x}' \quad \mathbf{y}' \quad \mathbf{z}']^T = \mathbf{R}(\mathbf{a}, \theta) \mathbf{I} + \sin \theta \mathbf{A}_r + (1 - \cos \theta) \mathbf{A}_r \mathbf{A}_r, \quad (3)$$

式中: \mathbf{x}' 、 \mathbf{y}' 、 \mathbf{z}' 分别为 x 、 y 、 z 轴的单位向量; $\mathbf{z}' = \mathbf{k}$; \mathbf{I} 表示单位矩阵; \mathbf{R} 表示旋转矩阵; r 表示光栅对 p 偏振光的衍射效率; \mathbf{A}_r 表示与 \mathbf{a} 相关的反对称矩阵,可表示为

$$\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

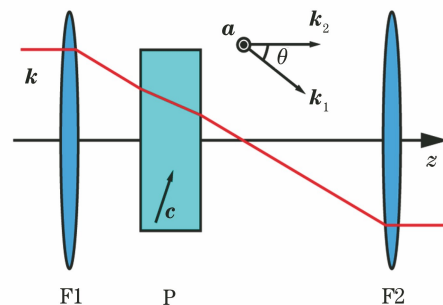


图 1 会聚光路中退偏器的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of depolarizer in converging optical path

将光线的偏振矢量 \mathbf{E} 建立在局部坐标系中,其不会随光线的偏折发生变化。矢量 \mathbf{E} 的变化只与光在晶体中传输的光程差有关,参照平行光束的相

位变化理论,本文只分析寻常光(o光)和非寻常光(e光)之间的相位差,忽略光线的分裂。光线方向 k 与晶体光轴 c 所在的平面为主平面,o光的偏振方向与主平面垂直,e光的偏振方向与主平面平行,o光和 e 光偏振方向对应的单位矢量分别为

$$\begin{cases} \mathbf{o} = \frac{\mathbf{k} \times \mathbf{c}}{\|\mathbf{k} \times \mathbf{c}\|} \\ \mathbf{e} = \frac{\mathbf{o} \times \mathbf{k}}{\|\mathbf{o} \times \mathbf{k}\|} \end{cases} \quad (5)$$

局部坐标系(l)向 oe 坐标系转换的 Jones 旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{l \rightarrow oe} = [\mathbf{e} \ \mathbf{o}]^T \cdot [\mathbf{x}' \ \mathbf{y}'] = \mathbf{R}_{oe \rightarrow l}^{-1} \quad (6)$$

光线穿过晶体后产生的相位差为

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d, \quad (7)$$

式中: λ 表示光线的波长; n_e 表示 e 光在晶体中的折射率,其值与 k 和 c 之间的夹角有关; n_o 表示 o 光在晶体中的折射率; d 为光线在晶体中的传输距离。光线穿过单片晶体后产生的相位差所对应的 Jones 矩阵^[9]为

$$\mathbf{J}_c = \mathbf{R}_{oe \rightarrow l} \cdot \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{i\Gamma}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{i\Gamma}{2}\right) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_{l \rightarrow oe} \quad (8)$$

退偏器由多片单轴晶体组成,因此在单根光线穿过退偏器后,Jones 矩阵可以表示为

$$\mathbf{E}_{out} = \prod_{j=n}^1 \left[\mathbf{R}_{oe \rightarrow l}^{(j)} \cdot \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{i\Gamma_j}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{i\Gamma_j}{2}\right) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_{l \rightarrow oe}^{(j)} \right] \cdot \mathbf{E}_{in}, \quad (9)$$

式中: n 表示晶体片数; j 表示入射光依次穿过晶体的序号。由于会聚光束中光线方向具有特殊性,每根光线的 Jones 矩阵都需要独立计算,因此可以利用光学设计软件中的光线追迹功能来完成该部分工作。

2.2 偏振敏感度

辅助光路实现了以平行光入射又以平行光出射,这里用 Stocks 矢量^[1,7,10-11]来表述光束以及单根光线的偏振状态:

$$\mathbf{S} = [I \ Q \ U \ V]^T, \quad (10)$$

式中: I 表示光线的强度; Q 表示偏振光在 x 轴分量和 y 轴分量的强度差; U 表示偏振光在与 x 轴成 45° 角和 135° 角两个方向分量的强度差; V 表示光线的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光分量的强度差^[12-13]。对于光线而言,其 Stokes 矢量可以表示为

$$\mathbf{S}_r = \begin{bmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_y E_x^* \\ i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ 2[|E_x| |E_y| \cos \delta] \\ 2[|E_x| |E_y| \sin \delta] \end{bmatrix} = I \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\omega \cos 2\alpha \\ \cos 2\omega \sin 2\alpha \\ \sin 2\omega \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: $*$ 表示共轭; δ 表示 E_x 和 E_y 的相位差; ω 表示偏振光的椭圆率所对应的角度, $\omega \in [-\pi/4, \pi/4]$, $\omega = 0$ 表示线偏振, $\omega = \pm \pi/4$ 表示圆偏振; α

为椭圆长轴与 x 轴的夹角。

图 2 为光瞳不同位置处光线的 Stokes 矢量,图 2(a)~2(c)分别对应 Stokes 矢量的 I 、 Q 和 U 。

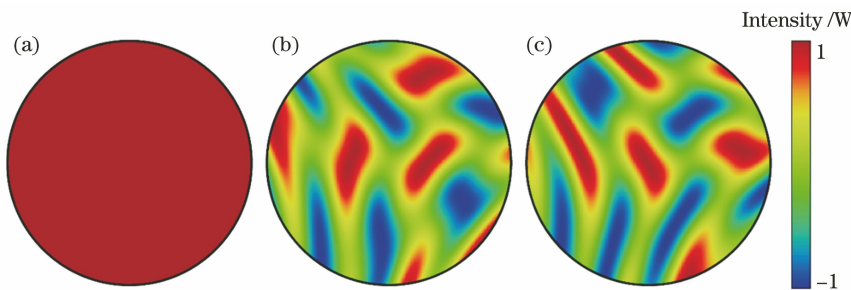


图 2 光瞳不同位置处光线的 Stokes 矢量。(a) I ;(b) Q ;(c) U
Fig. 2 Stokes vector of light rays at different positions of pupil. (a) I ; (b) Q ; (c) U

该退偏器可对线偏振入射光束进行不同程度的相位补偿,使得出射光线的偏振状态多样化,即光束的 Stokes 矢量发生变化。对于光束而言,其 Stokes 矢量可以看作光线强度的叠加^[14],可以表示为

$$\mathbf{S} = \sum_r \mathbf{S}_r = I \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \rho \cos 2\omega \cos 2\alpha \\ \rho \cos 2\omega \sin 2\alpha \\ \rho \sin 2\omega \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: ρ 表示光束的偏振度, $\rho = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} / I$,

$\rho=1$ 为完全偏振光, $\rho=0$ 为非偏振光, ρ 为其他值 ($\rho \neq 0$ 且 $\rho \neq 1$) 代表部分偏振光^[1]。光学元件的偏振特性用 Mueller 矩阵^[1,10,12,15-16]来表示,表达式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

系统的出射光强 T 可以表示为

$$\begin{aligned} T &= [1 \ 0 \ 0 \ 0] \mathbf{M}_s \mathbf{S}_{in} = [s_{11} \ s_{12} \ s_{13} \ s_{14}] \mathbf{S}_{in} = \\ &I \cdot [s_{11} + \rho \sqrt{s_{12}^2 + s_{13}^2} \sin(2\alpha + \varphi_\alpha) \cos 2\omega + \rho s_{14} \sin 2\omega] = \\ &I \cdot [s_{11} + \rho \sqrt{(s_{12}^2 + s_{13}^2) \sin^2(2\alpha + \varphi_\alpha) + s_{14}^2} \sin(2\omega + \varphi_\omega)], \end{aligned} \quad (14)$$

式中: \mathbf{M}_s 表示系统的 Mueller 矩阵; $s_{i'j'}$ ($i', j' = 1, 2, 3, 4$) 表示 \mathbf{M}_s 中的元素; $\varphi_\alpha, \varphi_\omega$ 为移动相位; \mathbf{S}_{in} 表示入射光偏振态的 Stokes 矢量。系统的偏振敏感度^[2,11,17]可以近似表示为

$$S_p = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} = \frac{\sqrt{s_{12}^2 + s_{13}^2 + s_{14}^2}}{s_{11}}, \quad (15)$$

式中: T_{\max} 表示最大出射光强; T_{\min} 表示最小出射光强。若 $S_p=0$,则说明出射光强 T 不受入射光偏振状态的影响,即对偏振不敏感,如普通透镜;若 $S_p=1$,则说明出射光强 T 与入射光的偏振状态直接相关,其最小值为 0,如偏振片。同理,在 Mueller 矩阵已知的情况下,光学元件的偏振敏感度可以利用式(15)来表示。

光栅刻线方向与狭缝方向一致,即 x 轴方向。由于光栅对 s 偏振光和 p 偏振光的衍射效率不同,此时光栅的 Mueller 矩阵^[4,17]可以表示为

$$\mathbf{M}_G = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q+r & q-r & 0 & 0 \\ q-r & q+r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{qr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{qr} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中: q 表示光栅对 s 偏振光的衍射效率。根据式(15)可以得到光栅的偏振敏感度为

$$S_{PG} = \frac{q-r}{q+r}. \quad (17)$$

各向同性的透镜对偏振没有影响,因此仅考虑退偏器和光栅这两个对偏振有影响的元件,系统的 Mueller 矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_s = \eta \mathbf{M}_G \mathbf{M}_D, \quad (18)$$

式中: η 表示透镜的光学效率; \mathbf{M}_D 表示退偏器的 Mueller 矩阵。系统的偏振敏感度可以表示为

$$S_p = \frac{\sqrt{(d_{12} + S_{PG}d_{22})^2 + (d_{13} + S_{PG}d_{23})^2 + (d_{14} + S_{PG}d_{24})^2}}{d_{11} + S_{PG}d_{21}}, \quad (19)$$

式中: $d_{i'j'}$ ($i', j' = 1, 2, 3, 4$) 表示 \mathbf{M}_D 中的元素。系统的偏振敏感度与光栅的偏振敏感度和退偏器的 Mueller 矩阵中前两行的数值有关,与其他参数无关。因此,若降低光谱仪的偏振敏感度,则只需减小退偏器出射光 Stokes 矢量的 I 值和 Q 值随入射光偏振方向的变化幅度,而不用一味地降低退偏器出射光的偏振度。

2.3 Mueller 矩阵的求解方法

根据系统的出射光和入射光的 Stokes 矢量,可以利用多重多元回归分析^[18-19]来求解系统的 Mueller 矩阵。回归分析自变量矩阵 \mathbf{X} 由 n 组入射光 Stokes 矢量组成,对应的 n 组出射光 Stokes 矢量组成的因变量矩阵 \mathbf{Y} 可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{X} = [\mathbf{S}_{in}^{(1)} & \mathbf{S}_{in}^{(2)} & \cdots & \mathbf{S}_{in}^{(n')}]^T \\ \mathbf{Y} = [\mathbf{S}_{out}^{(1)} & \mathbf{S}_{out}^{(2)} & \cdots & \mathbf{S}_{out}^{(n')}]^T \end{cases}, \quad (20)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \mathbf{M}^T, \quad (21)$$

式中: n' 表示样本数量; $\mathbf{S}_{in}^{(k)}$ 和 $\mathbf{S}_{out}^{(k)}$ 分别表示第 k 个样本的入射光偏振态和出射光偏振态; $k=1, 2, \dots, n'$ 。当 \mathbf{X} 列满秩时, Mueller 矩阵的计算值可以表示为

$$\hat{\mathbf{M}}^T = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}. \quad (22)$$

\mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 的误差越小, $\hat{\mathbf{M}}^T$ 越接近实际值。在实

验过程中,样本数要尽可能的多,用于中和实验过程中产生的误差。在模拟过程中,只存在计算误差且误差很小,样本数可以适当减少,以提升计算效率。

将 \hat{M}^T 代入式(21)可得

$$\hat{Y} = X\hat{M}^T. \quad (23)$$

模型的准确性可以用决定系数 R^2 来表示,其表达式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{u,v} (\hat{Y}_{u,v} - Y_{u,v})^2}{\sum_{u,v} (Y_{u,v} - \bar{Y})^2}, \quad (24)$$

式中: $\hat{Y}_{u,v}$ 表示样本实际值; \bar{Y} 表示样本平均值。决

定系数越接近于 1,计算结果与实际值越接近,说明模型的可行性越高。

2.4 退偏器设计方法

基于式(19)可以计算出退偏器模型的偏振敏感度,计算过程为光线追迹和数据分析两个步骤。这里使用 Zemax 光学设计软件进行光线追迹,使用 MATLAB 数学计算软件来完成数据分析,两者通过网络连接,Zemax 作为服务端,MATLAB 作为客户端,从而实现退偏器模型的自动化设计。设计流程如图 3 所示。在选定退偏器模型的基础上,根据设计要求来调整退偏器的结构参数,从而获得最优的设计结果。

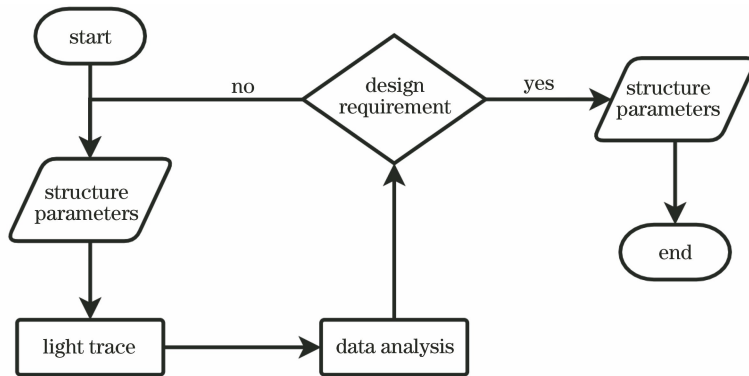


图 3 光谱仪会聚光路中退偏器的设计流程图

Fig. 3 Design flowchart of depolarizer in convergent optical path of spectrometer

3 方法验证与分析

3.1 设计要求

为了验证基于 Mueller 矩阵方法构建会聚光路中退偏器的可行性,设计了一款安装在光谱仪会聚光路中的退偏器。设计参数如表 1 所示,光谱的分辨率为 $0.3 \sim 0.5 \mu\text{m}$,光束的 F 数为 3.7,晶体所用的材料为石英,光谱仪的偏振敏感度小于 1%,狭缝宽度为 $50 \mu\text{m}$,光谱采样点数为 4。此外,由退偏器造成的像点分裂距离^[6,11]须小于狭缝宽度的 1/4,即小于 $12.5 \mu\text{m}$ 。

表 1 退偏器的设计指标

Table 1 Design parameters of depolarizer

Parameter	Description
Spectral range / μm	0.3-0.5
F number of telescope	3.7
Crystal material	Quartz
Polarization sensitivity / %	<1
Slit width / μm	50
Number of spectral oversampling	4

3.2 退偏器的设计

光谱仪采用反射光栅来分光,光栅刻线与 x 轴平行,光栅的最大偏振敏感度约为 15%。考虑到理论与实际之间的差异,以光栅偏振敏感度为 30% 的基准进行退偏器的设计。

退偏器的设计选用两种退偏器模型,分别是传统 HV 型退偏器及其改进型退偏器。改进型退偏器如图 4 所示,退偏器由两片晶体胶合而成,其中晶体 W1 和 W2 的光轴相互垂直,且分别与 x 轴成 45° 角,两者胶合面 S_{12} 关于 x 轴倾斜^[4]。从原理上

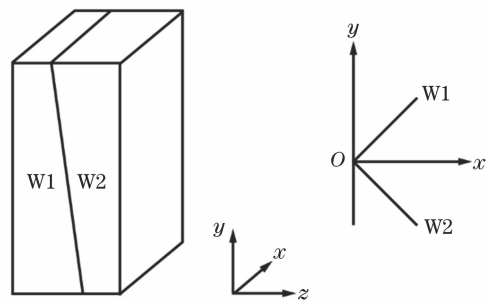


图 4 退偏器示意图

Fig. 4 Schematic of depolarizer

讲,当 HV 型退偏器绕 z 轴旋转 45° 时,两种模型在平行光束入射时会有相同的退偏效果。

为了验证会聚光路中退偏器的有效性,将其与以平行光入射的退偏器进行对比。两片晶体的厚度均为 4 mm ,退偏器的入射直径为 12.18 mm 。在会聚光路中,退偏器的后表面到狭缝的距离为 40 mm ,因此以平行光入射的退偏器的出射光由焦距为 40 mm 的望远镜进行成像。图 5 为在光栅偏振敏感度为 30% 时, $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ 波段中 5 个波长样本的系统偏振敏感度随退偏器倾角的变化。

图 5(a)和图 5(c)分别为以平行光束入射时传统 HV 型退偏器和改进型退偏器的偏振敏感度的变化曲线。从图 5(a)和图 5(c)可以看到:传统 HV 型退偏器和改进型退偏器的系统偏振敏感度变化完全相同;在倾斜角为 0° 时,退偏器没有获得退偏效

果,系统与光栅的偏振敏感度相等;在倾角不小于 0.5° 时,5 个波长样本的系统偏振敏感度均小于 1% ,且在 0.56° 附近退偏效果最好。

图 5(b)和图 5(d)分别为以会聚光束入射时传统 HV 型退偏器和改进型退偏器的偏振敏感度的变化曲线。从图 5(b)和图 5(d)可以看到:在倾斜角为 0° 时,系统的偏振敏感度小于 12% ,由此证明两片平行平板对会聚光束起到一定的退偏作用^[2];传统 HV 型退偏器的退偏效果随倾角的变化缓慢,在倾角为 0.8° 时,5 个波长样本的系统偏振敏感度才达到 1% ;在改进型退偏器的倾斜角大于 0.4° 时,不同波长下的偏振敏感度都小于 1% ,且波动幅度较小。

因此,选择改进型退偏器为最终的设计模型,考虑到晶体的加工公差,最终确定的胶合面倾角为 0.5° 。

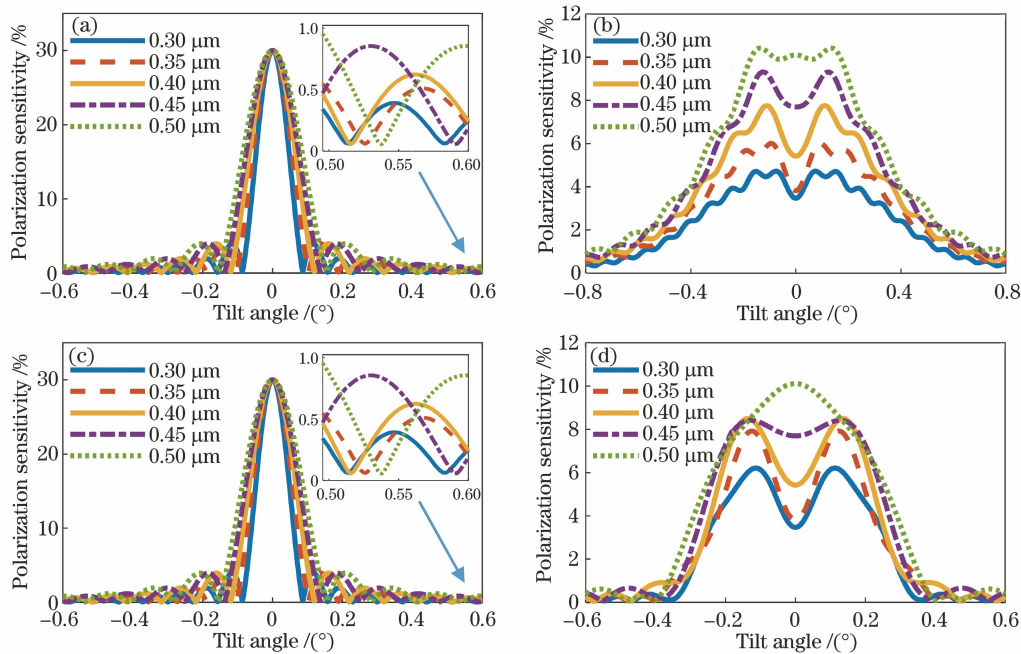


图 5 系统偏振敏感度随倾斜角的变化曲线。(a)平行光束入射和(b)会聚光束入射 HV 型退偏器; (c)平行光束入射和(d)会聚光束入射改进型退偏器

Fig. 5 Polarization sensitivity of system varies with inclination angle. (a) Parallel beam incidence and (b) converging beam incidence for HV depolarizer; (c) parallel beam incidence and (d) converging beam incidence for improved depolarizer

3.3 结果分析

为了判断两种模型的退偏效果,绘制出了其所在系统的偏振敏感度在光谱范围内的变化曲线,当光栅偏振敏感度分别为 0 、 15% 和 30% 时,系统偏振敏感度随波长的变化曲线如图 6 所示。从图 6 可以看到,系统偏振敏感度随光栅偏振敏感度的变大而变大。

图 6(a)和图 6(b)分别为以平行光束入射的 HV 型退偏器和以会聚光束入射的改进型退偏器的

分析结果。从图 6(a)和图 6(b)可以看到, HV 型退偏器和改进型退偏器的波形类似,且偏振敏感度均小于 1.0% ,且图 6(b)的结果优于图 6(a),说明改进型退偏器更适合应用在会聚光路中。

图 7 为两种模型所在系统的像点分裂图,图 7(a)和图 7(b)分别为以平行光束入射的 HV 型退偏器和以会聚光束入射的改进型退偏器所在系统的像点分裂情况。从图 7(a)和图 7(b)可以看到, HV 型退偏器和改进型退偏器的像点分裂距离均小

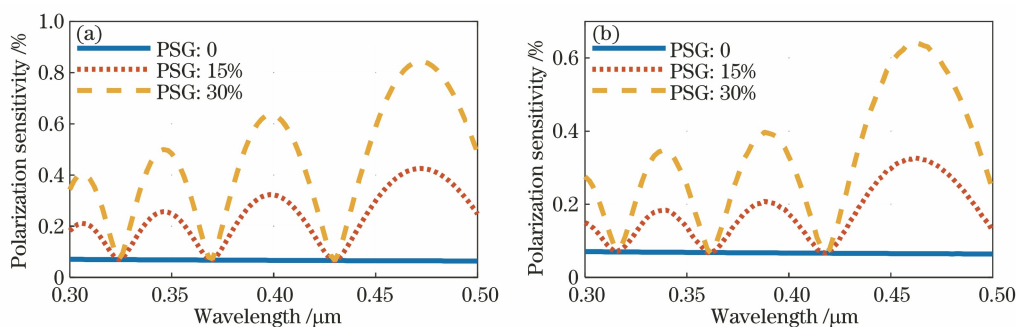


图 6 系统偏振敏感度随波长的变化曲线。(a)以平行光束入射的 HV 型退偏器;(b)以会聚光束入射的改进型退偏器
Fig. 6 Polarization sensitivity of system varies with wavelength. (a) HV-type depolarizer incident with parallel beam;
(b) improved depolarizer incident with convergent beam

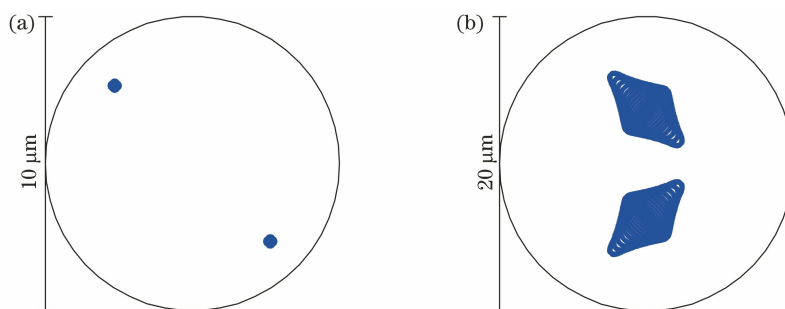


图 7 系统的像点分裂图。(a)以平行光束入射的 HV 型退偏器;(b)以会聚光束入射的改进型退偏器
Fig. 7 Image point split diagrams of system. (a) HV-type depolarizer incident with parallel beam;
(b) improved depolarizer incident with convergent beam

于 $8 \mu\text{m}$,以会聚光束入射的改进型退偏器对应的像点存在像散,但像散很小,两像点的弥散斑均方根(RMS)半径小于 $5 \mu\text{m}$ 。

综合而言,该设计在保证成像质量的情况下,满足偏振敏感度和像点分裂距离两方面的设计要求。

3.4 讨 论

以上结果显示,会聚光线与晶体光轴之间的夹角各异,因此改进型退偏器在会聚光路中会有更好的退偏效果,但穿过退偏器的会聚光束会发生一定程度的像散,会聚光束的孔径角不易过大。当倾斜角度相等时,以会聚光束入射的改进型退偏器会有更好的退偏效果,因此对于大孔径系统而言,在不影响成像质量的情况下,会聚光路中的改进型退偏器是更好的退偏选择。

该设计没有一味地追求降低退偏器出射光的偏振度,而是结合光栅的偏振特性来降低光谱仪的偏振敏感度,这对退偏器的设计更具有针对性。另外,该设计能快速计算出系统在不同孔径角、不同结构、不同波长和不同视场下的偏振敏感度,便于退偏器设计过程中的模型评估,直观地显示了退偏器的设计效果。

4 结 论

基于透镜的偏振各向同性,提出了在光谱仪的会聚光路中设计退偏器的方法,该方法将望远镜、退偏器和准直镜看作一个系统。系统以平行光入射,以平行光出射,使用 Stokes 矢量来表示光束的偏振状态,使用 Mueller 矩阵来表示系统的偏振特性,并计算系统的偏振敏感度。本文提出了基于 Mueller 矩阵在模拟及实验中的计算和评估方法,该方法在保证计算精度的同时提升了设计效率。本文又设计了一款在光谱仪的会聚光路中的改进型退偏器,其退偏效果优于以平行光入射的传统 HV 型退偏器,这验证了该设计的可行性。

参 考 文 献

- [1] Kattawar G W, Yang P, You Y, et al. Polarization of light in the atmosphere and ocean [M] // Kokhanovsky A A. Light scattering reviews 10. Springer praxis books. Chichester: Springer, 2016: 3-14.
- [2] Caron J, Bézy J L, Courrèges-Lacoste G B, et al. Polarization scramblers in Earth observing spectrometers: lessons learned from Sentinel-4 and 5

- phases A/B1[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10564: 105642B.
- [3] Windpassinger R, Schubert J, Kampf D. Proposed concept and preliminary design for the sentinel-5 UVNs spectrometer[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10563: 1056343.
- [4] Jin Y M, Shen W M. Design of double wedge depolarizer for grating imaging spectrometer [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10255: 1025522.
- [5] McGuire J P, Jr., Chipman R A. Analysis of spatial pseudodepolarizers in imaging systems [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1166: 95-108.
- [6] Loesel J, Dubreuil M, Pascal V, et al. Microcarb polarization scrambler [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10563: 1056318.
- [7] de Boer J F, Milner T E. Review of polarization sensitive optical coherence tomography and Stokes vector determination [J]. Journal of Biomedical Optics, 2002, 7: 359-371.
- [8] Dai J S. Euler-Rodrigues fomula variations, quaternion conjugation and intrinsic connections[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 92: 144-152.
- [9] Wu C, Li Q, Zhang Z H, et al. Control of phase, polarization, and amplitude based on geometric phase in a racemic helix array [J]. Photonics Research, 2021, 9(11): 2265-2276.
- [10] Azzam R M A. Stokes-vector and mueller-matrix polarimetry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2016, 33(7): 1396-1408.
- [11] Richert M, Dubroca G, Genestier D, et al. Soder recent development in the design and verification of passive polarization scramblers for space applications [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10562: 1056208.
- [12] Li J J, Wang H J, Liao R, et al. Statistical Mueller matrix driven discrimination of suspended particles [J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3645-3648.
- [13] Zhang C, Hu J P, Dong Y G, et al. High efficiency all-dielectric pixelated metasurface for near-infrared full-Stokes polarization detection [J]. Photonics Research, 2021, 9(4): 583-589.
- [14] Gao C, Lei B. Spatially modulated polarimetry based on a vortex retarder and Fourier analysis[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(2): 021201.
- [15] Wang S C, Li Z Y. Polarization scrambling characteristic analysis based on density of polarization states statistics[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(6): 060604.
- [16] Li J H, Li Y Q, Liu K, et al. Hybrid calibration method of a wide-view-angle Mueller polarimeter for hyper-numerical-aperture imaging systems [J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(8): 081202.
- [17] McClain S C, Maymon P W, Chipman R A. Design and analysis of a depolarizer for the NASA MODerate-resolution imaging spectrometer-tilt (MODIS-T)[J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1746: 375-385.
- [18] Al-Subaihi A A. Variable selection in multivariable regression using SAS/IML[J]. Journal of Statistical Software, 2002, 7(12): 1-20.
- [19] Jiang B, Meng K, Youcef-Toumi K. Quantification and reduction of Poisson-Gaussian mixed noise induced errors in ellipsometry[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27057-27070.