

# 晶体光轴取向和厚度对双光楔消偏器性能的影响

靳阳明<sup>1,2</sup>, 沈为民<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>苏州大学物理与光电·能源学部教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

<sup>2</sup>苏州大学物理与光电·能源学部江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

**摘要** 在消偏器工作原理的基础上, 利用米勒矩阵和斯托克斯矢量, 建立消偏器结构参数与光学系统偏振敏感度的一般关系。借助数值分析, 当两楔形晶体光轴夹角为  $90^\circ$  时, 消偏器具有优良的消偏性能, 并且光轴取向向下时调整晶体厚度可进一步减小光学系统偏振敏感度。以光栅成像光谱仪为例设计消偏器, 给出其性能评价。

**关键词** 光学设计; 成像光学系统; 米勒矩阵; 双光楔消偏器

**中图分类号** O436.3 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0822001

## Effect of Optical Axis Orientation and Thickness of Crystal on Performance of Double Wedge Depolarizer

Jin Yangming<sup>1,2</sup>, Shen Weimin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China,

College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>2</sup>Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, College of Physics,

Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** Based on the working principle of depolarizer, the general relationship between the structural parameters of depolarizer and the polarization sensitivity of optical system is established by applying Mueller matrix and Stokes vector. With numerical analysis, it is pointed out that the depolarizer has excellent depolarization performance when the angle between the optical axes of two wedge crystals is  $90^\circ$ . Under this orientation, selecting proper crystal thickness can further reduce the polarization sensitivity of optical system. Finally, taking grating imaging spectrometer as an example, we design a depolarizer and evaluate its performance.

**Key words** optical design; imaging optical system; Mueller matrix; double wedge depolarizer

**OCIS codes** 220.4830; 220.3620

## 1 引 言

消偏器能够消除光学系统对入射光偏振态的敏感性, 从而保证测量准确度和精度。消偏器的研究由来已久, 最初主要是用于光纤传感的 Lyot 型<sup>[1]</sup>, 近二三十年来逐渐发明可用于成像光谱仪的消偏器, 如单光楔型<sup>[2]</sup>、Lyot 改进型<sup>[3-4]</sup>、HV 型<sup>[5-7]</sup>、双光楔旋光型<sup>[8]</sup>和双巴比涅型<sup>[9-10]</sup>等。其中, Lyot 改进型、HV 型和双光楔旋光型属于双光楔型, 能够弥补单光楔型出射光束易发生严重偏折和发散的缺点, 同时其结构比专用于高精度大气成分测量的双巴比涅型结构更加简单, 因此引起国内外学者广泛的关注<sup>[3-8]</sup>。但双光楔消偏器的研究除文献<sup>[3]</sup>涉及厚度对 Lyot 改进型消偏器性能影响外, 均是基于特殊晶体光轴取向和厚度, 缺少一般性的考虑与分析。

**收稿日期:** 2017-03-01; **收到修改稿日期:** 2017-04-01

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFB0500501)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

**作者简介:** 靳阳明(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光学设计与光学仪器方面的研究。E-mail: jym\_good@126.com

**导师简介:** 沈为民(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学设计和仪器光学以及航天遥感技术等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn(通信联系人)

为了设计和选用最优化双光楔消偏器,本文借助米勒矩阵和斯托克斯矢量法,结合成像光学系统特点,建立双光楔消偏器晶体光轴取向、楔角、晶体厚度和通光口径等参数与光学系统偏振敏感度之间的一般关系,并重点分析晶体光轴取向和厚度对光学系统偏振敏感度的影响,同时兼顾消偏器对光学系统成像质量的影响。最后,以衍射光栅成像光谱仪为例设计消偏器,给出其消偏性能及对像质的影响。

## 2 结构与原理

双光楔消偏器结构如图 1 所示,由两块楔角均为  $\alpha$  的楔形双折射晶体  $W_1$  和  $W_2$  胶合组成,设坐标系  $O-XYZ$  的原点  $O$  位于楔形晶体  $W_1$  前表面中心, $Y$  轴和  $Z$  轴的指向如图 1 所示, $X$  轴的指向垂直纸面向里,楔形晶体  $W_1$  的前表面位于  $XOY$  面内,楔形晶体  $W_2$  后表面与  $XOY$  面平行, $t_1$  和  $t_2$  为两楔形晶体中心厚度, $C_1$  和  $C_2$  为两楔形晶体光轴,它们与  $XOY$  面平行,与  $X$  轴的夹角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。一般情况下, $\theta_1$  不等于  $\theta_2$ ,即两楔形晶体的光轴不平行,当  $\theta_1$  等于  $\theta_2$  时,两楔形晶体的光轴平行,相当于一块厚度为  $t_1+t_2$  的波片。

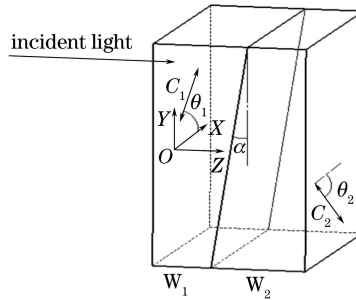


图 1 双光楔消偏器结构示意图

Fig. 1 Schematic of double wedge depolarizer structure

圆和椭圆偏振光可等效为具有恒定相位差、相同振动频率且振动方向相互垂直的线偏振光,因此消偏器能够对线偏振光消偏,亦可对圆和椭圆偏振光消偏。当任意偏振方向的线偏振光垂直入射到楔形双折射晶体  $W_1$  的前表面时,经折射后分解为  $o$  光和  $e$  光,它们的偏振方向分别与光轴  $C_1$  垂直和平行。在胶合面处,这两束光经楔形晶体  $W_2$  的前表面折射,各自又分解为  $o$  光和  $e$  光,由于楔角  $\alpha$  通常较小,可近似认为  $o$  光和  $e$  光的主平面重合,新分解的  $o$  光和  $e$  光偏振方向分别与光轴  $C_2$  垂直和平行。用字母  $oo$ 、 $oe$ 、 $eo$ 、 $ee$  分别标识这 4 束光,设入射光在晶体  $W_1$  前表面的初始相位为 0,则这 4 束光从消偏器出射时的相位为

$$\phi_{lm} = \frac{2\pi}{\lambda}n_l(t_1 + Y\tan\alpha) + \frac{2\pi}{\lambda}n_m(t_2 - Y\tan\alpha), \quad (1)$$

式中  $l, m$  为  $o$  或  $e$ , 分别表示光束在前后两楔形晶体中的偏振属性,  $n_l, n_m$  分别为  $l$  光和  $m$  光的折射率,  $Y$  为空间坐标,  $\lambda$  为入射光波长。这 4 束光经消偏器后相位延迟不同,在消偏器后表面将看到出射光的偏振态随空间位置  $Y$  在线偏振、圆或椭圆偏振之间周期性变化,成像意味着通光口径内所有光束会聚和各偏振态光的叠加,叠加后的光表现为非偏性。

因双折射晶体对  $o$  光和  $e$  光的折射率不同,经楔形晶体  $W_2$  前表面折射产生的  $o$  光和  $e$  光的传输方向不同,其夹角  $\Delta\theta$  与晶体楔角大小和材料有关:

$$\Delta\theta = 2\arcsin[(n_o - n_e)\tan\alpha], \quad (2)$$

式中  $n_e, n_o$  分别为  $e$  光和  $o$  光的折射率,与晶体材料有关。因此,4 束出射光经后续光学系统成像后将形成 4 个或 2 个空间分离的像点,导致成像质量下降。

## 3 理论分析

### 3.1 消偏振分析

设入射光和经成像光学系统出射后的光的斯托克斯矢量分别为  $\mathbf{S}_{in}$  和  $\mathbf{S}_{out}$ , 它们之间的转换关系可由光学系统的米勒矩阵来表示:

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \mathbf{M}_s \mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{M}_s$  为光学系统米勒矩阵,  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  和  $V$  分别为斯托克斯矢量的 4 个分量。

根据偏振光学原理<sup>[11]</sup>, 反射镜、成像透镜和二向色性滤光片等非晶体光学元件的米勒矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{non-crystal}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} T_x + T_y & T_x - T_y & 0 & 0 \\ T_x - T_y & T_x + T_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{T_x T_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{T_x T_y} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

楔形晶体的米勒矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{crystal}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos(\varphi + \delta y) & [1 - \cos(\varphi + \delta y)] \cos 2\theta \sin 2\theta & -\sin 2\theta \sin(\varphi + \delta y) \\ 0 & [1 - \cos(\varphi + \delta y)] \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos(\varphi + \delta y) & \cos 2\theta \sin(\varphi + \delta y) \\ 0 & \sin 2\theta \sin(\varphi + \delta y) & -\cos 2\theta \sin(\varphi + \delta y) & \cos(\varphi + \delta y) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $T_x$  和  $T_y$  分别为入射线偏光振动方向沿  $X$  和  $Y$  方向时光学元件的透过率,  $y$  为相对于通光口径  $D$  的归一化坐标,  $\varphi$  为两晶体中心厚度处  $o$  光和  $e$  光的相位延迟,  $\delta$  为  $o$  光和  $e$  光相位延迟随归一化坐标  $Y$  变化的快慢,  $\varphi$  和  $\delta$  分别为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) t, \quad (6)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) D \tan \alpha. \quad (7)$$

对成像光学系统而言, 消偏器出射的光束最终聚焦成像于像面, 这相当于是对消偏器通光口径内出射光进行积分, 所以, 双光楔消偏器可用其平均米勒矩阵  $\bar{\mathbf{M}}_p$  表示,

$$\bar{\mathbf{M}}_p = \frac{1}{\pi} \iint_{\Sigma} \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 dx dy, \quad (8)$$

式中  $\Sigma$  为光瞳面, 1 和 2 分别表示前后两块楔形晶体。

光学系统的米勒矩阵由各光学元件的米勒矩阵按光线传输经过的先后顺序相乘得到, 然后由(3)式得到出射光的斯托克斯矢量  $\mathbf{S}_{\text{out}}$  为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_0 \bar{\mathbf{M}}_p \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (9)$$

式中  $\mathbf{M}_0$  为无消偏器时光学系统的米勒矩阵。  $\mathbf{S}_{\text{out}}$  的第一项  $\mathbf{S}_{\text{out}0}$  表示光强, 为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{\text{out}0} = & \frac{1}{2} (T_{x0} + T_{y0}) I_0 + \frac{1}{2} (T_{x0} - T_{y0}) \cdot \frac{1}{\pi} \iint_{\Sigma} (M_{2,22} M_{1,22} + M_{2,23} M_{1,32} + M_{2,24} M_{1,42}) dx dy \cdot Q_0 + \\ & \frac{1}{2} (T_{x0} - T_{y0}) \cdot \frac{1}{\pi} \iint_{\Sigma} (M_{2,22} M_{1,23} + M_{2,23} M_{1,33} + M_{2,24} M_{1,43}) dx dy \cdot U_0 + \\ & \frac{1}{2} (T_{x0} - T_{y0}) \cdot \frac{1}{\pi} \iint_{\Sigma} (M_{2,22} M_{1,24} + M_{2,23} M_{1,34} + M_{2,24} M_{1,44}) dx dy \cdot V_0, \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $T_{x0}$  和  $T_{y0}$  分别表示无消偏器时光学系统对振动方向沿  $X$  和  $Y$  方向的线偏振光的透过率。

偏振敏感度定义为<sup>[7]</sup>: 入射线偏振光偏振方向转过  $180^\circ$  时, 光学系统出射光最大光强  $S_{\text{out}0, \text{max}}$  与最小光强  $S_{\text{out}0, \text{min}}$  之差与它们之和的比值。由(10)式求出对应的  $S_{\text{out}0, \text{max}}$  与  $S_{\text{out}0, \text{min}}$ , 然后便可得到光学系统的偏振敏感度  $P$ ,

$$P = \left| \frac{S_{\text{out}0, \text{max}} - S_{\text{out}0, \text{min}}}{S_{\text{out}0, \text{max}} + S_{\text{out}0, \text{min}}} \right| \times 100\% = \sqrt{a^2 + b^2} \left| \frac{T_{x0} - T_{y0}}{T_{x0} + T_{y0}} \right| \times 100\%, \quad (11)$$

式中  $\left| \frac{T_{x0} - T_{y0}}{T_{x0} + T_{y0}} \right|$  为使用消偏器前光学系统的偏振敏感度,  $\sqrt{a^2 + b^2}$  为消偏器对光学系统偏振敏感度的影响, 它们共同决定光学系统的偏振敏感度, (11)式即为晶体光轴取向、楔角、光瞳口径、晶体厚度与光学系统偏振敏感度之间的一般关系式。  $a$ 、 $b$  分别为

$$a = \frac{1}{\pi} \iint_{\Sigma} (M_{2,22}M_{1,22} + M_{2,23}M_{1,32} + M_{2,24}M_{1,42}) dx dy = \cos^2 2\theta_2 \cos^2 2\theta_1 + 2 \frac{J_1(\delta)}{\delta} \cos^2 2\theta_2 \sin^2 2\theta_1 \cos \varphi_1 + 2 \frac{J_1(\delta)}{\delta} \cos^2 2\theta_1 \sin^2 2\theta_2 \cos \varphi_2 + \sin^2 2\theta_2 \sin^2 2\theta_1 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \frac{J_1(2\delta)}{2\delta} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \right] + \sin 2\theta_2 \sin 2\theta_1 \left[ \frac{1}{2} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - \frac{J_1(2\delta)}{2\delta} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right] + \left[ 1 - 2 \frac{J_1(\delta)}{\delta} \cos \varphi_1 - 2 \frac{J_1(\delta)}{\delta} \cos \varphi_2 + \cos \varphi_2 \frac{1}{2} \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \frac{J_1(2\delta)}{2\delta} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \right] \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1, \quad (12)$$

$$b = \frac{1}{\pi} \iint_{\Sigma} (M_{2,22}M_{1,23} + M_{2,23}M_{1,33} + M_{2,24}M_{1,43}) dx dy = \left\{ \cos^2 2\theta_2 - 2 \frac{J_1(\delta)}{\delta} \cos^2 2\theta_2 \cos \varphi_1 + 2 \frac{J_1(\delta)}{\delta} \sin^2 2\theta_2 \cos \varphi_2 - \sin^2 2\theta_2 \left[ \frac{1}{2} \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \frac{J_1(2\delta)}{2\delta} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \right] \right\} \cos 2\theta_1 \sin 2\theta_1 + \left\{ \sin^2 2\theta_1 - 2 \frac{J_1(\delta)}{\delta} \sin^2 2\theta_1 \cos \varphi_2 + 2 \frac{J_1(\delta)}{\delta} \cos^2 2\theta_1 \cos \varphi_1 - \cos^2 2\theta_1 \left[ \frac{1}{2} \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \frac{J_1(2\delta)}{2\delta} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \right] \right\} \cos 2\theta_2 \sin 2\theta_2 + \sin 2\theta_2 \cos 2\theta_1 \left[ \frac{1}{2} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - \frac{J_1(2\delta)}{2\delta} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \right], \quad (13)$$

式中  $J_1(\cdot)$  为一阶贝塞尔函数。

上述推导得到的公式复杂, 不易直接看出光学系统偏振敏感度与消偏器参数之间的关系, 下面通过数值计算进行直观分析。

首先, 分析晶体光轴取向与光学系统偏振敏感度之间的关系。取参考波长  $0.9 \mu\text{m}$ , 设无消偏器时光学系统偏振敏感度为 20%。令两楔形晶体光轴与 X 轴的夹角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为变量, 消偏器其他结构参数如下: 光瞳口径为 20 mm, 楔角为  $0.6^\circ$ , 楔形晶体  $W_1$  和  $W_2$  的中心厚度均为 2 mm, 石英晶体材料。由(11)式得到光学系统偏振敏感度与晶体光轴取向之间的关系, 如图 2 所示。由图可知, 在某些晶体光轴取向, 光学系统偏振敏感度最小可等于零, 具有最优消偏效果, 偏离这些光轴取向时, 消偏器性能下降。当选择其他参考波长时, 可得到与图 2 类似的结果, 但是数值上会有差别, 若仅用晶体光轴的配准, 不能对具有一定光谱范围的每个波长都实现消偏, 因此还需要同时选择晶体的楔角、光瞳口径和厚度等结构参数。

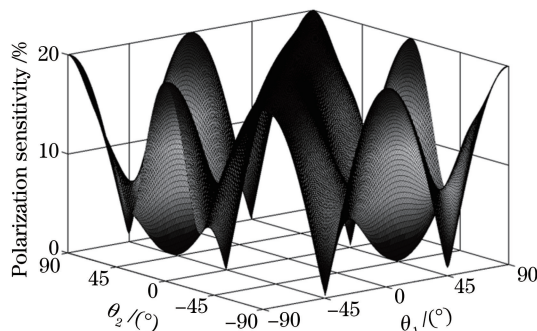


图 2 晶体光轴取向与光学系统偏振敏感度的关系

Fig. 2 Relationship between optical axis orientation of crystal and polarization sensitivity of optical system

进一步分析可知, 晶体光轴取向可分为两类, 即 I 型和 II 型。因此, 在下述楔角、光瞳口径和晶体厚度对光学系统偏振敏感度影响分析中, 只需考虑 I 型和 II 型条件的双光楔消偏器。I 型和 II 型消偏器情况下, 光学系统偏振敏感度如表 1 所示。

表 1 I 型和 II 型消偏器情况下的光学系统偏振敏感度

Table 1 Polarization sensitivities of optical systems with type I and type II depolarizers

Type	$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	Polarization sensitivity of optical system
I	$\pm 45$	$\pm 90, 0$	$P_I = 2 \cdot \frac{J_1(\delta)}{\delta} \cdot \cos \varphi_1 \cdot  (T_{x0} - T_{y0}) / (T_{x0} + T_{y0})  \times 100\%$
II	$\pm 45$	$\pm 45$	$P_{II} = \frac{J_1(2\delta)}{\delta} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \cdot  (T_{x0} - T_{y0}) / (T_{x0} + T_{y0})  \times 100\%$

然后,分析楔角和光瞳口径与光学系统偏振敏感度的关系。在 I 型和 II 型条件下,分别令楔角和光瞳口径为变量,保持消偏器及光学系统其他参数不变,由表 1 得到楔角和光瞳口径与光学系统偏振敏感度的关系分别如图 3 和图 4 所示。由图可知,随着楔角或光瞳口径增加,光学系统偏振敏感度曲线均呈降低趋势,但 II 型降低更快,意味着在相同消偏下,II 型消偏器所需的楔角或光瞳口径比 I 型的小。

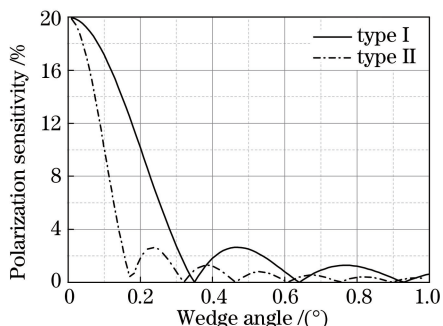


图 3 楔角与光学系统偏振敏感度的关系

Fig. 3 Relationship between wedge angle and polarization sensitivity of optical system

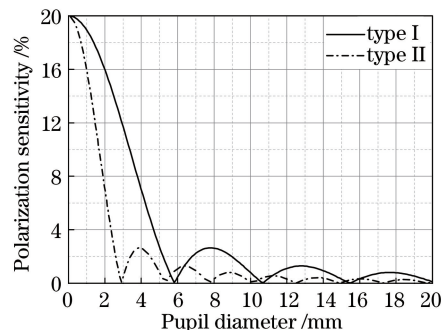


图 4 光瞳口径与光学系统偏振敏感度的关系

Fig. 4 Relationship between pupil diameter and polarization sensitivity of optical system

最后,分析晶体厚度对消偏器性能的影响。由表 1 可知,I 型和 II 型消偏器影响光学系统偏振敏感度的厚度因子分别为  $\cos \varphi_1$  和  $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$ ,其中

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)t_1, \tag{14}$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)(t_1 - t_2). \tag{15}$$

对于 I 型,厚度因子仅与楔形晶体  $W_1$  的中心厚度  $t_1$  有关,通常  $2\pi(n_e - n_o)t_1$  的值远大于波长  $\lambda$ ,相位因子  $\cos \varphi_1$  随波长剧烈变化,即光学系统偏振敏感度随波长剧烈变化。而对于 II 型,当两楔形晶体的厚度之差不大或等于零时,相位因子  $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$  随波长在  $0 \sim 1$  之间缓慢变化或恒等于 1,通过适当选取  $t_1$  与  $t_2$  的值,可使  $\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$  在某一波长处等于或接近于零,从而选择性地优化偏振敏感度,使整个工作波段范围内光学系统均具有较低偏振敏感度。在 II 型消偏器下,楔形晶体  $W_1$  中心厚度  $t_1$  为 2.000 mm,楔形晶体  $W_2$  的中心厚度  $t_2$  分别为 2.016 mm 和 2.000 mm 时,光学系统的偏振敏感度曲线如图 5 所示。可见,晶体

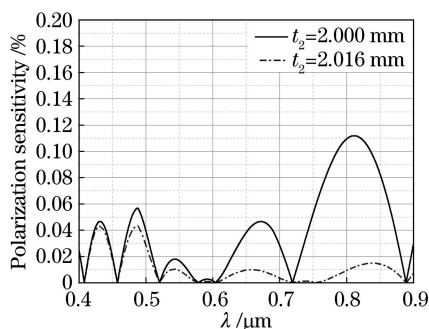


图 5 II 型消偏器下光学系统的偏振敏感度曲线

Fig. 5 Polarization sensitivity curves of optical system with type II polarizer

厚度的选择可以改变光学系统偏振敏感度。

由上述分析可知, I型和 II型条件下, 消偏器均具有良好的消偏效果, 但 II型消偏器具有楔角小, 偏振敏感度不随波长剧烈变化, 且通过优化晶体厚度可进一步降低光学系统偏振敏感度的优点, 故在今后设计中可选择 II型消偏器。

### 3.2 消偏器对像质的影响

当两楔形晶体光轴垂直时, 由晶体  $W_1$  前表面折射产生的 o光和 e光经楔形晶体  $W_2$  前表面折射后分别变为 e光和 o光, 共有两束光从消偏器出射。经光学系统后, 将在像面产生两个像点, 双像分离距离  $d$  与楔角  $\alpha$ 、系统焦距  $f$  和晶体双折射率差  $n_e - n_o$  有关,

$$d = 2f(n_e - n_o)\alpha, \quad (16)$$

仅考虑消偏器对像质的影响, 点扩展函数可表示为

$$f_{ps} = \frac{1}{2} \left[ \delta\left(x - \frac{d}{2}\right) + \delta\left(x + \frac{d}{2}\right) \right]. \quad (17)$$

对(17)式作傅里叶变换并取模, 得到消偏器的调制传递函数(MTF)为

$$f_{MT} = |F\{f_{ps}\}| = |\cos(\pi vd)|, \quad (18)$$

式中  $F\{\cdot\}$  表示傅里叶变换,  $v$  为空间频率, 评价消偏器对成像质量的影响时,  $v$  取为探测器奈奎斯特频率。分析(18)式可知, 消偏器的调制传递函数随着像点分离距离  $d$  的增大而减小, 成像质量变差。对于特定的光学系统, 其焦距  $f$  通常是已定的, 像点分离距离  $d$  与所选晶体材料和楔角成正比, 要想有小的像点分离距离, 则需要有小的  $n_e - n_o$  或  $\alpha$ , 但由(7)式和表 1 可知, 这样会减弱消偏器的性能。因此, 在设计消偏器时, 应尽可能减小光栅和光学系统本身的偏振敏感度, 减小消偏器的消偏负担, 从而在实现光学系统低偏振敏感度要求的同时保证像质。

## 4 设计举例

以典型结构的光栅成像光谱仪为例, 如图 6 所示, 它由消偏器、二反前置物镜和 Offner 分光装架组成, 指标见表 2。要求光学系统在工作范围内具有低偏振敏感度( $<0.5\%$ ), 且偏振敏感度曲线不随波长剧烈变化。

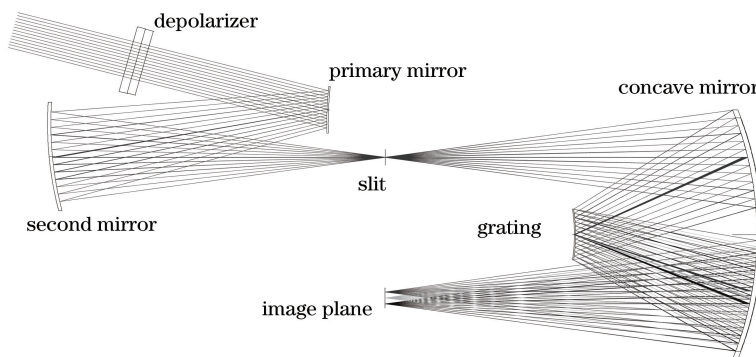


图 6 设计实例光路图

Fig. 6 Optical path of design example

表 2 设计实例指标

Table 2 Indexes of design example

Index	Value
Spectral range	0.4-1.0 $\mu\text{m}$
Fore-optics focal length	67.47 mm
Fore-optics $F$ -number	3.5
Field	6.92°
Spectral channel	128
Sampling rate	3
Detector pixel size	16 $\mu\text{m}$

光学系统的光瞳口径为 19.28 mm,由反射镜和衍射光栅等元件对偏振方向沿  $X$  和  $Y$  方向入射光的反射率和衍射效率及偏振敏感度定义,得到光栅成像光谱仪偏振敏感度曲线如图 7 所示,其最大值约为 7%。使用 II 型消偏器,选择石英晶体,依据表 1 和(18)式,优化楔角和晶体厚度,得到当楔角为  $0.13^\circ$ 、楔形晶体  $W_1$  和  $W_2$  的中心厚度分别为 2.000 mm 和 2.021 mm 时,光学系统在整个工作波段内均具有低偏振敏感度,其偏振敏感度曲线如图 8 所示,最大约为 0.43%。此时,双像分离距离约为  $2.8 \mu\text{m}$ ,奈奎斯特频率为 31.25 lp/mm 处消偏器的调制传递函数为 0.963。可见,光学系统对偏振的敏感性得到有效消除,像质受消偏器影响小。

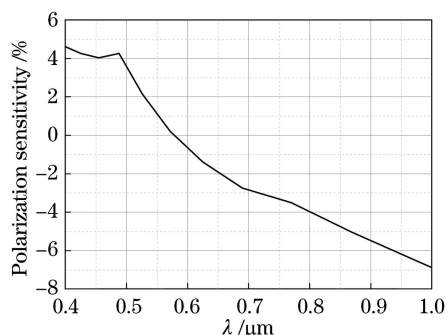


图 7 使用消偏器前光栅成像光谱仪偏振敏感度  
Fig. 7 Polarization sensitivity of grating imaging spectrometer before using a depolarizer

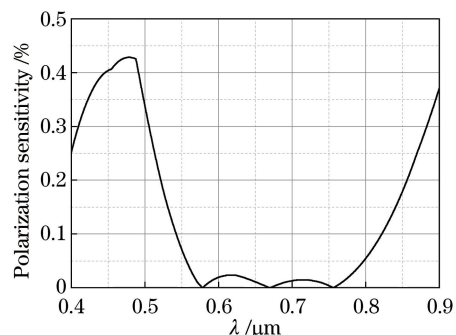


图 8 使用消偏器后光栅成像光谱仪偏振敏感度  
Fig. 8 Polarization sensitivity of grating imaging spectrometer after using a depolarizer

## 5 结 论

借助米勒矩阵和斯托克斯矢量推导了双光楔消偏器晶体光轴取向、楔角、光瞳口径和晶体厚度等参数与光学系统偏振敏感度之间的一般关系,通过数值分析得到消偏器最优光轴取向和楔角、通光口径及晶体厚度取值特点,最后以光栅成像光谱仪为例设计了消偏器。分析指出当两楔形晶体光轴夹角为  $90^\circ$  时,通过适当调整晶体厚度,消偏器可具有最小楔角,从而在满足消偏要求的同时保证了像质,且偏振敏感度曲线不随波长剧烈变化。

## 参 考 文 献

- [1] Burns W. Degree of polarization in the Lyot depolarizer[J]. Journal of Lightwave Technology, 1983, 1(3): 475-479.
- [2] Ge J H, Chen Z, Chen Y F, *et al.* Optimized design of parameters for wedge-crystal depolarizer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 110-116: 3351-3357.
- [3] Chen Fang, Xu Pengmei. Depolarizer design for broadband imaging grating spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0422002.  
陈 芳, 徐彭梅. 宽波段成像光栅光谱仪消偏器的设计[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0422002.
- [4] Bourg L, Delwart S. MERIS instrument calibration[C]. MERIS and AATSR Calibration and Geophysical Validation, 2006.
- [5] McClain S C, Chipman R A, Hillman L W. Aberrations of a horizontal-vertical depolarizer[J]. Applied Optics, 1992, 31(13): 2326-2331.
- [6] 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.
- [7] 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)[C]. SPIE, 1992, 1746: 375-385.
- [8] Song Shixia, Song Lianke. Analysis of double plate rotation depolarizer by Mueller matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1947-1950.  
宋师霞, 宋连科. 双光楔旋光退偏器的 Mueller 矩阵分析[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1947-1950.
- [9] Chipman R A, McGuire J P. Analysis of spatial pseudodepolarizers in imaging systems[J]. Optical Engineering, 1990, 29(12): 1478-1484.
- [10] Dobber M R, Dirksen R J, Levelt P F, *et al.* Ozone monitoring instrument calibration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5): 1209-1238.
- [11] Goldstein D H. Polarized light[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011: 96, 220.