

文章编号:1007-2780(2023)12-1728-08

通道型偏振光谱仪望远镜组偏振效应分析与优化

李作恩^{1,2}, 鞠学平¹, 胡春晖^{1*}, 颜昌翔^{1,3}, 赵雪梅⁴, 杨 斌⁵

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049;

4. 航天系统部 装备部 装备项目管理中心, 北京 100094;

5. 长光禹辰信息技术与装备(青岛)有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 为了满足高精度偏振探测要求,通道型偏振光谱仪在设计时需要考虑望远镜组偏振效应的影响,并对其进行相应的分析和优化。首先,分析望远镜组偏振效应的影响因素,采用坐标变换和穆勒矩阵连乘法建立了考虑膜系偏振效应的望远镜组穆勒矩阵模型,并带入通道型偏振光谱仪偏振解调模型。接着,通过同时控制 S 光和 P 光的透过率和相位延迟,设计相应的低偏振效应膜系。最后,运用偏振光线追迹的方法对镀有不同膜系的望远镜组进行偏振效应仿真。仿真结果表明,在 580 nm 和 750 nm 波长处,低偏振效应膜系与高偏振效应膜系的偏振探测精度变化不明显。而在 420 nm 波长处,低偏振效应膜系相较于常用膜系的边缘视场偏振探测精度提高了 3.22%。低偏振效应膜系可以有效降低通道型偏振光谱仪望远镜组偏振效应,提高仪器的偏振探测精度。

关键词: 偏振光谱相机;偏振效应;斯托克斯矢量;穆勒矩阵

中图分类号:O436.3 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2023-0049

Analysis and optimization of polarization effect of telescope group of channel polarization spectrometer

LI Zuo-en^{1,2}, JU Xue-ping¹, HU Chun-hui^{1*}, YAN Chang-xiang^{1,3}, ZHAO Xue-mei⁴, YANG Bin⁵

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Center of Materials Science and Optoelectrics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Equipment Project Management Center of the Equipment Department of the Aerospace Systems Department, Beijing 100094, China;

5. Changguang Yuchen Information Technology and Equipment (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high-precision polarization detection, the influence of the polarization effect of the telescope group needs to be considered in the design of the channel-type polarization spectrometer, and the corresponding analysis and optimization should be carried out. First, the influencing factors of the polarization effect of the telescope group are analyzed, and the Mueller matrix model of the

收稿日期:2023-02-09;修订日期:2023-03-14.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(No. 62105331)

Supported by National Natural Science Foundation of China Youth Science Fund(No. 62105331)

*通信联系人, E-mail: famous226@163. com

telescope group considering the polarization effect of the film system is established by using coordinate transformation and Mueller matrix multiplication method, which is brought into the polarization demodulation model of the channel polarimeter. Next, by simultaneously controlling the transmittance and phase retardation of S light and P light, a corresponding film system with low polarization effect is designed. Finally, the polarization effect simulation of the telescope group coated with different film systems is carried out by using the method of polarization ray tracing. The simulation results show that at the wavelengths of 580 nm and 750 nm, the polarization detection accuracy of the film system with low polarization effect and the film system with high polarization effect does not change significantly. At the wavelength of 420 nm, the polarization detection accuracy of the edge field of view of the low polarization effect film system is 3.22% higher than that of the common film system. The low polarization effect film system effectively reduces the polarization effect of the telescope group of the channel-type polarization spectrometer and improves the polarization detection accuracy of the instrument.

Key words: polarization spectrum camera; polarization effect; stokes vector; muller matrix

1 引言

近年来,由于通道型偏振光谱仪可同时获取目标物体的空间强度、光谱信息和偏振信息,在生命科学^[1-2]、大气气溶胶探测^[3-5]和目标识别^[6-8]等众多领域有重要的应用价值,因此构建具有高精度的通道型偏振光谱仪对大气科学、生物医学等领域研究具有重要意义。

通道型偏振光谱仪由望远镜组、强度调制模块、成像镜组、光谱仪和探测器组成。目标光线在通道型偏振光谱仪的传输过程中,望远镜组和成像镜组均会改变光线的偏振态,导致仪器的偏振探测精度降低。经过分析,发现对入射光线具有准直功能的望远镜组对于仪器偏振探测精度的影响相较于成像镜组更为严重^[9]。如果将望远镜组移除使大角度光线直接入射到强度调制模块上,光线会在强度调制模块内发生多次反射,导致光线在强度调制模块内的传输模型复杂化^[10-11];而且强度调制模块内元件的尺寸会变得更大,增加系统的加工成本。所以,望远系统对于通道型偏振光谱仪来说是非常重要的。由于望远镜组的加入,一些研究人员对其偏振效应是否影响偏振光谱仪的偏振探测精度进行了分析。杨斌^[9]对望远镜组施加不同的偏振效应,观察了复原后的斯托克斯矢量与理论参考值之间的相对误差。邢文赫^[12]通过建立偏振辐射传输模型,得到仪器望远镜组的二向衰减与相位延迟对于系统的偏振探测影响较大。虽然

上述研究表明望远镜组中的偏振效应会影响仪器的偏振探测精度,但是并未具体分析光波波长、入射角度大小对于望远镜组偏振效应的关系。另外,为保证仪器的光线透过率,望远镜组均会镀有光学薄膜,光学薄膜的偏振特性对于光线波长与入射角度比较敏感^[13-14],当仪器工作视场以及波长范围变大时,经过望远模组后光线的偏振特性会发生明显的改变。现在偏振探测仪器有着向更大视场和更宽谱段的设计趋势。因此,研究光线波长与入射角度对望远镜组偏振效应以及对偏振探测精度的影响有着重要的研究意义和应用价值。

本文针对偏振仪器大视场、宽谱段的设计趋势,建立了考虑膜系偏振效应的望远镜组穆勒矩阵模型,并设计了低偏振效应薄膜,运用偏振光线追迹的方法仿真出不同膜系的偏振效应与光线波长和入射角度的关系。建立了不同波长和视场下望远镜组偏振效应对偏振测量精度的影响模型,通过傅里叶变换和穆勒矩阵传递法分析望远镜组偏振效应对仪器的偏振探测精度的影响。

2 基本原理

2.1 通道型偏振光谱仪的工作原理

通道型偏振光谱仪运用的是偏振光谱强度调制技术(Polarimetric Spectral Intensity Modulation, PSIM),其最早由日本学者 Oka^[15]和美国学者 Ian-

narilli^[16]等同时提出,工作原理如图 1 所示。该技术的核心器件由两个多级相位延迟器和一个偏振分析器组成,该模块将入射光线的斯托克斯参量分别调制到不同频率上,用光谱仪接收并进行傅里叶逆变换后,各斯托克斯光谱分量在光程差域上彼此分开,然后采用带通滤波实现频域截取并通过傅里叶变换获取以下 3 项参数:

$$F_1(\sigma) = \frac{1}{2} S_0(\sigma), \quad (1)$$

$$F_2(\sigma) = \frac{1}{4} S_1(\sigma) e^{i[2\pi L_2 \sigma + \phi_2(\sigma)]}, \quad (2)$$

$$F_4(\sigma) = \frac{1}{8} S_{23}(\sigma) e^{i[2\pi(L_2 - L_1)\sigma + \phi_2(\sigma) - \phi_1(\sigma)]}. \quad (3)$$

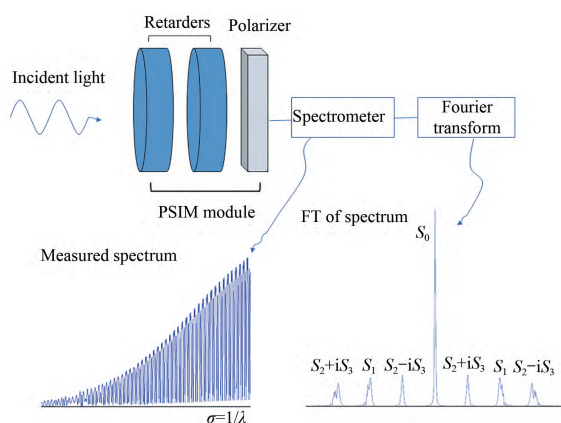


图 1 PSIM 的工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of PSIM

2.2 望远镜组偏振效应影响因素

由于光学透镜属于非理想偏振元件,偏振效应主要由 3 部分组成:二向衰减、相位延迟和退偏效应^[17]。二向衰减为介质对不同振动方向偏振光的吸收不同,即元件在不同方向上的透过率不同。二向衰减 D 的公式如式(4)所示:

$$D = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}}, \quad (4)$$

式中, $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别表示最大透过率和最小透过率。

相位延迟是元件在其本征极化(本征态)之间引入的相位差,对于折射率为 n_1 和 n_2 以及厚度为 t 的双折射延迟器,在 λ 波长下,以弧度表示的延迟 δ 如式(5)所示:

$$\delta = \frac{2\pi |n_1 - n_2| t}{\lambda}. \quad (5)$$

退偏效应主要发生在散射过程中,其本质上属

于偏振光相干性的减退,通常其在光学系统中的影响非常微弱,可以忽略不计。

由上述理论可知,由光学透镜组成的望远镜组中的偏振效应主要来源于二向衰减与相位延迟。在实际工程中,为了满足光学仪器的透过率要求,都会在透镜表面镀上增透膜。但是增透膜不仅可以提高光线的透过率,也是引起光学界面偏振效应产生的主要来源。

透射式镜组的偏振效应主要由于其透镜表面膜系而引起^[18],光学薄膜材料折射率会随波长的变化而变化且光线入射角度的变化会导致光线的偏振分离,引起光线偏振态的变化。在本文中,通道型偏振光谱仪望远镜组的相位延迟主要由于非正入射光线经过光学薄膜所引起,根据矩阵法分析光学薄膜的光学特性即可得到光学薄膜的特征矩阵:

$$\begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_i} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: $\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda$ 为第 $j(j=1, 2, \dots, m)$ 膜层(以靠近入射介质的膜层为第一层)的有效相位厚度, η_j 为第 j 膜层的有效导纳(对 S 光: $\eta_{js} = n_j \cos \theta_j$, 对 P 光: $\eta_{jp} = n_j / \cos \theta_j$), η_g 为基底材料的折射率, d_j 为第 j 膜层的厚度, θ_j 为光线在第 j 层的传播角度, η_g 为基底材料有效导纳(对 S 光: $\eta_{gs} = n_g \cos \theta_g$, 对 P 光: $\eta_{gp} = n_g / \cos \theta_g$), θ_0 为光线的入射角, n_0 为入射介质材料的折射率, i 为虚数单位。正是由于 S 光和 P 光导纳的不同,导致相位延迟的产生。

3 望远镜组偏振效应分析与优化

为说明望远镜组偏振效应对通道型偏振光谱仪偏振探测精度的影响,需要建立望远镜组偏振效应对其偏振探测精度的影响模型。本文以一个半视场为 23° ,工作波段为 $420 \sim 860 \text{ nm}$,光学结构如图 2 所示的望远镜组为例进行评价分析。

该望远镜组由 3 部分组成,按照光线传播顺序依次为前置望远镜组、强度调制模块和后置望远镜组。杨斌^[9]对前置望远镜组和后置望远镜组所引起的偏振效应对仪器偏振探测精度的影响进行分析,得到前置望远镜组偏振效应严重影

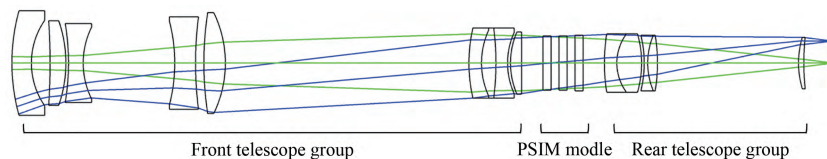


图 2 望远镜组结构

Fig. 2 Telescope group structure

响仪器的偏振探测精度的结论。本文针对前置望远镜组展开分析与优化工作。

3.1 望远镜组偏振效应对偏振精度的影响模型

通道型偏振光谱相机应用场景在自然光下,通常琼斯矩阵只能作用于纯偏振态,例如激光和偏振片出射的光束,不适合表述自然光源出射的部分偏振光和非偏振光。本文通过穆勒矩阵来描述望远镜组光学元件的偏振特性,为此需要了解光学透

镜界面的穆勒矩阵表达方法。在均匀和各向同性界面透射玻璃上,有S光和P光本征偏振,并且透射界面极化是二向衰减和相位延迟的组合,特征极化与S和P平面对齐。以S光振动方向为 x 轴,P光的振动方向为 y 轴, δ_i 为透镜界面引入的S光和P光之间的相位延迟, T^S 为S光的透过率, T^P 为P光的透过率。光学界面的穆勒矩阵是双衰减器和缓速器穆勒矩阵的乘积,透镜光学界面穆勒矩阵为^[19]:

$$M_i = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \begin{bmatrix} 1 & D_i & 0 & 0 \\ D_i & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{1-D_i^2} \cos \delta_i & \sqrt{1-D_i^2} \sin \delta_i \\ 0 & 0 & -\sqrt{1-D_i^2} \sin \delta_i & \sqrt{1-D_i^2} \cos \delta_i \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$M_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} T^S + T^P & T^S - T^P & 0 & 0 \\ T^S - T^P & T^S + T^P & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{T^S T^P} \cos \delta_i & 2\sqrt{T^S T^P} \sin \delta_i \\ 0 & 0 & 2\sqrt{T^S T^P} \sin \delta_i & 2\sqrt{T^S T^P} \cos \delta_i \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对于有光学薄膜的透射界面,根据菲涅尔公式可知,当光线非正入射至光学界面时 $\delta_i \neq 0$ 。根据光学成像原理,同一视场下的平行光线入射会聚焦于探测器的一点。但是由于透镜自身曲率的原因,同一视场角入射下不同光瞳处的光线入射角有差异。为了更精确地描述同一视场角下透镜界面的穆勒矩阵,本文需要将不同光瞳处穆勒矩阵相加并取均值,得到的结果作为该视场下的透镜界面穆勒矩阵。上述透镜界面穆勒矩阵是以平行与垂直于入射面建立的局部坐标系,对于不同光瞳处的穆勒矩阵则需要运用穆勒旋转算符将其转换至同一坐标系下。以平行和垂直于透镜中心光瞳处的S光振动方向为 X 轴和 Y 轴,以系统光轴为 Z 轴建立坐标系。光线入射面与 X 轴夹角为 θ 时,透射穆勒矩阵的旋转算符为 $R(\theta)$,则透射光学界面穆勒矩阵的旋转方程为:

$$M_T(\theta) = R(\theta) M_i R(-\theta). \quad (9)$$

随后构建望远镜组偏振效应对偏振测量精

度影响模型,设目标光线的斯托克斯矢量为 S_{in} ,光线经过望远镜组和强度调制模块后的斯托克斯矢量为 S_{out} ,斯托克斯矢量和穆勒矩阵连乘的顺序与公式(11)穆勒矩阵级联的次序一致,按照光线经过光学元件的先后排序:

$$S_{out} = M_p M_{R2} M_{R1} M S_{in}, \quad (10)$$

式中: M_p 为强度调制模块中偏振片的穆勒矩阵; M_{R2} 、 M_{R1} 为强度调制模块中两个波片的穆勒矩阵; M 为望远镜组总的穆勒矩阵。

随后接收探测器的光强数据并进行傅里叶逆变换。出射光线的斯托克斯矢量会在光程差域上分开,然后采用带通滤波实现频域截取并通过傅里叶变换,得到目标光线的斯托克斯矢量。根据斯托克斯矢量计算得到光线的偏振度(Degree of polarization, DOP)。DOP是国际上常用的用于衡量偏振光学仪器系统偏振测量精度的典型参量,其定义如式(11)所示:

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \tag{11}$$

3.2 膜系的偏振效应影响

由公式(6)可知,膜系偏振效应会随着光线的入射角度和光线波长的变化而改变。在现阶段通道型偏振光谱仪望远镜组设计中,并没有特别设计低偏振效应膜系,而是使用常用的多层减反射膜。现在光学探测仪器向大视场和宽波段的方向发展,通道型偏振光谱仪对偏振方面有着严格的要求。在保证系统整体透过率的前提下,按照使S光和P光的透过率和相位延迟差值在大角度光线入射的情况下尽可能小的设计要求,进行膜系设计和迭代。考虑膜系偏振效应设计出膜系2,选取常用减反射膜系设计出膜系1。这两种膜系的膜层结构如表1所示。

不同膜系的二向衰减值与入射角度的关系如

表 1 不同膜系的膜层结构

	Thin film_1	Thin film_2
Structure	1 [(LH)·6L]1.744	1 [(LH)·7]1.744
Symbol_L	SiO ₂	SiO ₂
Symbol_H	TiO ₂	Ta ₂ O ₅
Thickness/nm	662.3	505.4

图3所示,以420 nm、580 nm和750 nm波长为例。可以看出,两种膜系的二向衰减值均会随着入射角度的增大而增大,而且光线波长越短,二向衰减值受光线入射角度变化越明显。通过对比可知,420 nm和580 nm波长处的光线以不同角度入射时,膜系2的二向衰减值较膜系1显著降低。例如在420 nm波长处,膜系2的二向衰减值为0.311%,比膜系1处降低了0.286%,但是在750 nm处牺牲了一些二向衰减指标。从图4可以看到,相位延迟

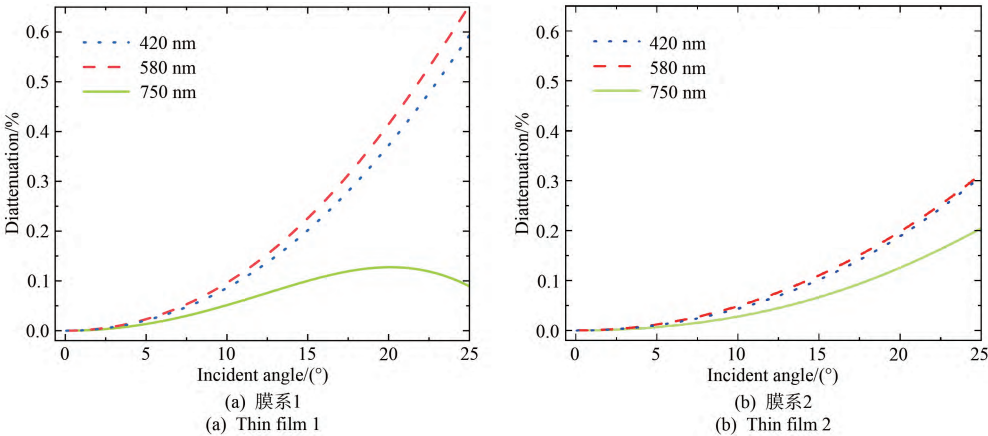


图 3 不同膜系的二向衰减与入射角度的关系

Fig. 3 Relationship between diattenuation and incident angle of different film systems

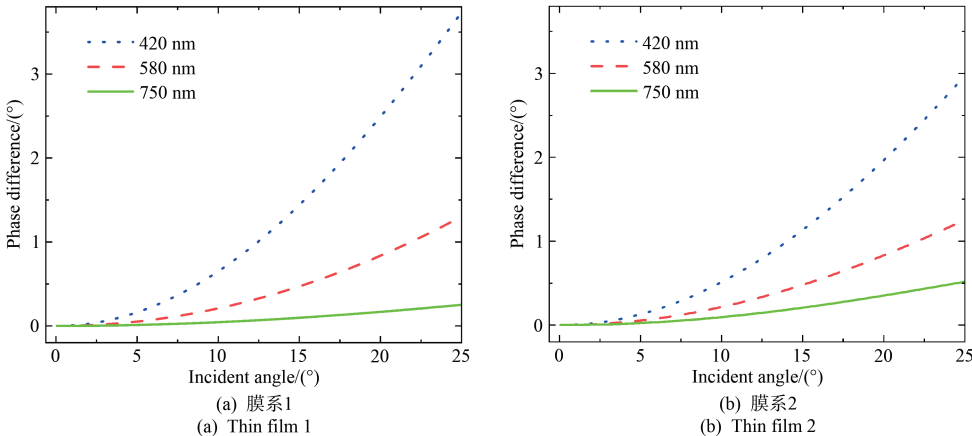


图 4 不同膜系的相位延迟与入射角度关系

Fig. 4 Relationship between phase retardation and incident

值随光线入射角度变化的改变与二向衰减值趋势一致。通过使S光和P光的相位延迟差值最小的设计思路,420 nm和580 nm波长处各个角度光线入射时,膜系2的相位延迟值较膜系1有明显下降。

3.3 膜系的偏振效应对仪器偏振探测精度的影响

偏振探测精度是衡量通道型偏振光谱仪的关键参数,其精度受其望远镜组偏振效应的影响,通过计算仪器的偏振探测精度可以得到望远镜组不同膜系所产生的偏振效应对于通道型偏振光谱仪偏振探测精度的影响。

本文模拟仿真30°线偏振光作为入射至系统的目标光,使用偏振光线追迹法^[19-22]计算望远镜头模组在420~860 nm波长和0°~23°视场下各界面的二向衰减和相位延迟值,随后带入望远镜组偏振效应对偏振测量精度的影响模型,通过复原后的斯托克斯矢量计算引入望远镜组偏振效应后的仪器偏振探测精度。仿真时,忽略强度调制模块的方位角安装误差及偏振效应。

镀不同膜系望远镜组的偏振探测精度如图5所示。通过图5可以发现,望远镜组在镀不同膜系时,通道型偏振光谱仪的偏振探测精度随波长和视场角变化的趋势基本一致。偏振探测精度与视场角的大小成负相关,与光线的波长成正相关。在420 nm波长和边缘视场下,望远镜组的偏振效应对于仪器偏振探测精度影响最大。随着波长的增大和入射角度的减小,偏振探测精度也逐渐提高。在420~620 nm波长范围下,光线波长与视场角的变化导致望远镜组偏振效应增大,严重影响通道型偏振光谱仪的偏振探测精度。而在620~820 nm波长范围下,偏振探测精度受光线波长与视场角的影响减弱,不同膜系下的仪器偏振探测精度随视场角的增大变化不明显。以750 nm波长数据为例,仪器的偏振探测精度均在99.72%以上。因此,在实际测量过程中,需要重点关注420~620 nm波长范围内,不同视场角下的偏振探测数据。表2为镀有两种膜系的望远镜组在不同波长和视场处的仪器的偏振探测精度。

由表2可以得到,在420 nm和580 nm波长下,镀有膜系2的望远镜组仪器的偏振探测精度在中心视场与边缘视场处均高于镀有膜系1的仿真结果,尤其是在420 nm边缘视场下的偏振探测精度

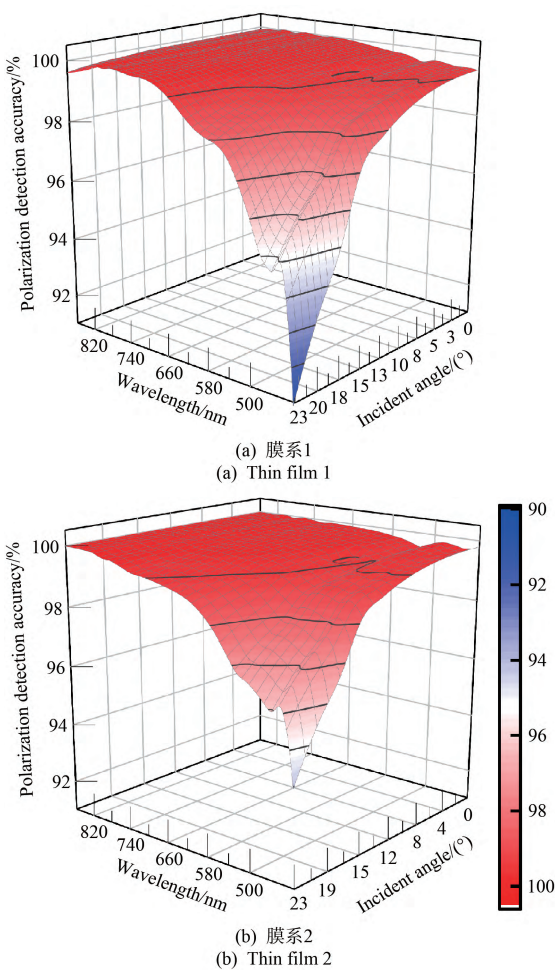


图5 镀不同膜系望远镜组的偏振探测精度
Fig. 5 Polarization inversion accuracy of telescope groups coated with different thin films

表2 不同膜系的偏振探测精度
Tab. 2 Polarization detection accuracy of different films

Wavelength/nm	Polarization detection accuracy/%			
	Thin film_1		Thin film_2	
	0°	23°	0°	23°
420	99.53	90.91	99.80	94.13
580	99.77	98.45	99.80	98.64
750	100.00	99.99	99.99	99.72

提高了3.22%。这是由于在此波长下,膜系2的偏振效应低于膜系1。由以上结果可以得出,低偏振效应膜系可以有效降低望远镜组的偏振效应,提高通道型偏振光谱仪的偏振探测精度。

4 结 论

望远镜组的作用是将入射到强度调制模块

的光线准直,是保证通道型偏振光谱仪正常工作不可或缺的一部分。但其在镀膜后所引入的偏振效应会改变入射至强度调制模块光线的偏振态,导致仪器偏振探测精度降低。另外,现在偏振光谱仪器大视场和宽谱段的设计趋势更加增大了对镀膜后望远镜组偏振效应分析的复杂性,所以有必要从视场与波长两个方面分析望远镜组偏振效应对仪器偏振探测精度的影响。本文分析了望远镜组偏振效应的影响因素,建立了镜组偏振效应对偏振测量精度的影响模型。

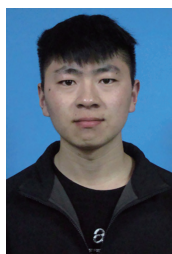
在降低膜系偏振效应的要求下,进行了膜系设计和迭代。运用偏振光线追迹的方法研究了两种膜系在不同波长和视场范围下的偏振效应。最后,带入望远镜组偏振效应对偏振测量精度的影响模型,计算了在不同视场和不同波段下仪器的偏振探测精度。仿真结果表明,420 nm 边缘视场下的偏振探测精度提高了 3.22%。使用设计的低偏振效应膜系可以降低由望远镜组的偏振效应,有效提高通道型偏振光谱仪的偏振探测精度。

参 考 文 献:

- [1] ZHOU S, BIAN J, CHEN P, *et al.* Polarization-dispersive imaging spectrometer for scattering circular dichroism spectroscopy of single chiral nanostructures [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 64.
- [2] 乔文龙,周亮,刘朝晖,等. 生物组织多光谱偏振特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(4): 1070-1075.
QIAO W L, ZHOU L, LIU Z H, *et al.* Study on multispectral polarization characteristics of biological tissues [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(4): 1070-1075. (in Chinese)
- [3] 孙晓兵,宋茂新,吴洋,等. 航空遥感大气多角度偏振辐射计及测试实验分析[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(22): 2847-2859.
SUN X B, SONG M X, WU Y, *et al.* Analysis of the atmospheric multi-angle polarimetric radiometer for aerial remote sensing and its test experiments [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(22): 2847-2859. (in Chinese)
- [4] 李岩,张伟杰,陈嘉玉. 偏振场景目标探测的建模与仿真[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2233-2243.
LI Y, ZHANG W J, CHEN J Y. Modeling and simulation for target detection in polarization scene [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2233-2243. (in Chinese)
- [5] HUANG C, CHANG Y Y, XIANG G F, *et al.* Polarization measurement accuracy analysis and improvement methods for the directional polarimetric camera [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38638-38666.
- [6] 马莉莉. 基于光谱分析与偏振成像的目标识别技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
MA L L. Research on target recognition techniques based on spectrometry analysis and polarization imaging [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 彭文竹,张禹,王钦,等. 基于正交偏振方向的多幅图像复原新方法[J]. *液晶与显示*, 2017, 32(10): 835-845.
PENG W Z, ZHANG Y, WANG Q, *et al.* New method of multiple image restoration based on orthogonal polarization direction [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(10): 835-845. (in Chinese)
- [8] ISLAM M N, TAHTALI M, PICKERING M. Man-made object separation using polarimetric imagery [C]//*Proceedings of SPIE 11197, SPIE Future Sensing Technologies*. Tokyo: SPIE, 2019: 111971C.
- [9] 杨斌. 强度调制型偏振光谱成像系统测量误差及定标研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
YANG B. Research on measurement error and calibration of intensity modulated spectropolarimetric imaging system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2018. (in Chinese)
- [10] HSIEH C H, TSAI C C, WEI H C, *et al.* Determination of retardation parameters of multiple-order wave plate using a phase-sensitive heterodyne ellipsometer [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(23): 5944-5950.
- [11] JONES S H, IANNARILLI F J, KEBABIAN P L. Realization of quantitative-grade fieldable snapshot imaging spectropolarimeter [J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6559-6573.
- [12] 邢文赫. 通道色散型偏振光谱成像系统偏振辐射标定研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
XING W H. Research on polarimetric and radiometric calibration of channeled dispersion imaging spectropolarimeter [D].

- Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2021. (in Chinese)
- [13] MILLER S, JIANG L N, PAU S. Birefringent coating to remove polarization aberrations [J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 20629-20646.
- [14] 李旸晖,郝翔,史召邑,等. 光学薄膜诱导偏振像差对大数值孔径光学系统聚焦特性的影响[J]. *物理学报*, 2015, 64(15): 154214.
- LI Y H, HAO X, SHI Z Y, *et al.* Effect of coating-induced polarization aberrations on the focusing properties in high numerical aperture optical system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(15): 154214. (in Chinese)
- [15] OKA K, KATO T. Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(21): 1475-1477.
- [16] IANNARILLI F J JR, JONES S H, SCOTT H E, *et al.* Polarimetric-spectral intensity modulation (P-SIM): enabling simultaneous hyperspectral and polarimetric imaging [C]//*Proceedings of SPIE 3698, Infrared Technology and Applications XV*. Orlando: SPIE, 1999: 474-481.
- [17] 波恩,沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭荪,译. 7版. 北京:电子工业出版社,2012:365-368.
- BORN, WOLF. *Principles of Optics* [M]. YANG J S, trans. 7th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 365-368. (in Chinese)
- [18] 蔡清元,蒋林,李耀鹏,等. 光学薄膜与系统的偏振控制[J]. *红外*, 2018, 39(12): 1-7.
- CAI Q Y, JIANG L, LI Y P, *et al.* Polarization control of optical films and systems [J]. *Infrared*, 2018, 39(12): 1-7. (in Chinese)
- [19] CHIPMAN R A. *Handbook of Optics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [20] YUN G, CRABTREE K, CHIPMAN R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus I: definition and diattenuation [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2855-2865.
- [21] YUN G, MCCLAIN S C, CHIPMAN R A. Three-dimensional polarization ray-tracing calculus II: retardance [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(18): 2866-2874.
- [22] HE W J, FU Y G, LIU Z Y, *et al.* Three-dimensional polarization aberration functions in optical system based on three-dimensional polarization ray-tracing calculus [J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 128-134.

作者简介:



李作恩(1998—),男,山东济宁人,硕士研究生,2020年于山东理工大学获得学士学位,主要从事偏振效应方面的研究。E-mail:941987449@qq.com



胡春晖(1986—),男,河南信阳人,博士,副研究员,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,从事光学系统装调、检测方面的研究。E-mail:famous226@163.com