

文章编号:1002-2082(2010)03-0345-05

AOTF 成像光谱仪光机系统设计

常凌颖^{1,2}, 赵葆常¹, 邱跃洪¹, 汶德胜¹, 吴萌源¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 基于AOTF成像光谱仪原理样机的总体设计方案, 提出工作谱段范围400 nm~900 nm声光可调谐滤波器(AOTF)成像光谱仪系统的光机系统设计。该原理样机的光学系统采用三组镜头组合而成, 前置望远镜系统采用1倍的物镜与准直镜光学系统组合, 成像镜同时采集由AOTF产生的正交偏振的正、负一级衍射图像, 全系统在32 lp/mm的空间频率下, MTF大于0.7。

关键词: 光学设计; 光谱成像仪; AOTF; 正交偏振

中图分类号: TN202; TH732

文献标志码: A

Optical and mechanical design of imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter

CHANG Ling-ying^{1,2}, ZHAO Bao-chang¹, QIU Yue-hong¹, WEN De-sheng¹, WU Meng-yuan¹

(1. Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China;

2. Graduate School of CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the system design concept of acousto-optic tunable filter (AOTF) imaging spectrometer, optomechanical design for an acousto-optic tunable filter (AOTF) imaging spectrometer was presented. It consisted of three group optic lenses. The fore-optical system included objective and collimating lens and the imaging lens collected the +1 and -1 orthogonally polarized orders produced by the AOTF at the same time. The whole system is achromatized from 0.4~0.9 microns and imaging resolution is better than 32 lp/mm when MTF reach 0.7.

Key words: optical design; imaging spectrometer; AOTF; polarization

引言

声光可调滤波器(AOTF)是利用各向异性介质中的声光作用研制成的一种新型声光器件。AOTF的主要结构包括声光晶体和键合在它上面的压电换能器。AOTF的工作原理:压电换能器能够将加载于其上的电信号转换成同频率的超声波,超声波在晶体中传播过程中会和入射光波产生非线性效应;当满足布拉格衍射条件时,入射光将发生布拉格衍射,衍射光的波长与驱动电信号的频率

存在着——对应关系,所以只要改变驱动电信号的频率即可改变衍射光的波长,从而达到滤波的作用。作为一种新型的分光元件,AOTF与传统分光器件相比具有:体积小,均为固体结构,无活动部件,对振动不敏感;通光孔径和入射角孔径都很大;衍射效率高;视场角也较大;调谐灵活而且速度快,调谐范围宽。AOTF的光谱分辨率很好,可以满足一般应用的需要,还具有再现性,有实现在计算机控制下灵敏运转的可行性。这些特性均反映出了AOTF

收稿日期:2009-12-08; 修回日期:2010-01-02

基金项目:863项目(2006AA12Z133);西部之光联合学者项目(20072H02)

作者简介:常凌颖(1977—),女,陕西西安人,博士研究生;主要从事光学设计、空间光学方面的研究工作。

E-mail:lychang@opt.ac.cn

应用于光谱成像技术上的巨大潜力^[1]。

首先, 基于 AOTF 的成像光谱仪, 可以用作机载或星载探测器, 利用其获得的宏观信息直接应用于以下领域, 为经济社会发展提供决策支持:

1) 土地资源利用。利用遥感获得的光谱信息, 可以用于矿产勘探、城市规划、城郊土地分类利用、土地沙化治理和土壤侵蚀监测等, 提高土地资源利用效益和水平。

2) 林业应用。利用遥感获得的光谱信息, 可以进行林业资源调查和伐林造林监测等, 促进林业资源的保护、开发和利用。

3) 生态应用。利用遥感获得的光谱信息可以进行环境监测、陆地生态研究和区域生态环境评价等, 为生态环境治理和保护提供科学依据。

4) 农业应用。利用遥感获得的光谱信息可以进行大面积农业资源(土壤类型、土壤养分、土壤水分等)监测、农作物产量预测、农作物长势分析预测、病虫害监测等, 实现精准农业, 提升农业生产力^[2]。

其次, 基于 AOTF 的成像光谱仪可以应用于烟草、石油化工、化学、生物医药、食品饮料、造纸、饲料、煤炭和纺织品等传统产业, 进行化学分析、临床医学检验、工业监测、在线质量控制、现场品质检测和显微光谱成像等^[3-4]。

本文根据声光可调谐滤波器(AOTF)成像光谱仪系统的总体技术要求设计出了一种应用于 AOTF 成像光谱仪的光机系统。该原理样机光学系统在工作谱段范围 400 nm~900 nm 内是复消色差并达到衍射极限的, 并且该光学系统可以同时获得同一目标的 O、E 偏振光信息^[5]。

1 AOTF 光谱成像仪总体方案

1.1 技术指标

系统的工作波段为 400 nm~900 nm, 光谱通道数为 128(波数等间隔), 光谱分辨率为 1.75 nm (@400 nm), 所获得的图像大于 128×128 个像元。CCD 采用 E2V 公司的背照 EMCCD, 像元大小 16μm×16μm, 像元数 512×512, 满阱电子数 130 ke⁻。

1.2 系统构成

仪器主要由前置光学系统、AOTF、成像光学系统、探测器、控制时序/视频处理/接口和可控射频信号源组成。图1所示为 AOTF 光谱成像仪原理样机框图。自然光经前置光学系统准直后进入 AOTF, 在可控射频信号源产生的射频信号控制下, AOTF 将入射光衍射成对应谱段的偏振态正

交的 O 光和 E 光, 经两组成像光学系统后分别成像在各自的 CCD 上。控制时序/接口为图像传感器和可控射频信号源提供电源和控制信号, 根据控制接口传来的指令设置仪器的工作模式和参数, 将视频处理部分输出的数字视频信号通过输出接口传送到采集计算机, 可控射频信号源根据控制时序/接口设定的波段参数, 产生相应频率的射频信号, 经电压放大和功率放大后驱动 AOTF。

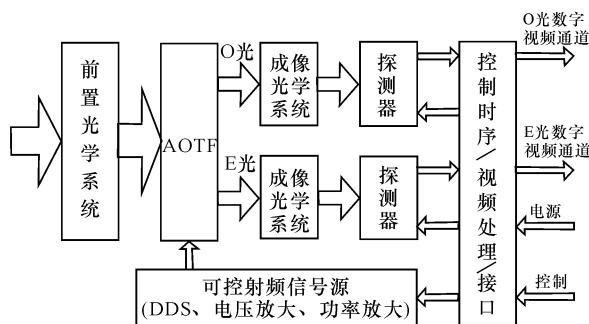


图1 AOTF 光谱成像仪原理样机原理框图

Fig.1 Framework of AOTF imaging spectrometer

1.3 工作原理

AOTF 偏振光谱成像仪由物镜、准直镜、TeO₂ 晶体、收集镜及 CCD 组成, 如图 2 所示。

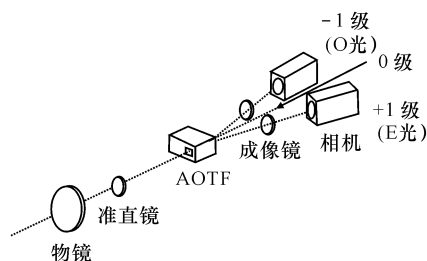


图2 AOTF 偏振光谱成像仪结构示意图

Fig.2 The structure of AOTF imaging spectrometer

光学系统包括由物镜和准直镜组成的前置望远光学系统、AOTF 和成像光学系统组成。光束经前置望远光学系统、准直后进入 AOTF, 经 AOTF 调谐后产生零级衍射光和正负一级偏振态正交的 O 与 E 衍射光, 零级光采用光学陷阱消除, 正负一级衍射光经各自的成像光学系统后分别会聚到图像传感器感光面。

2 AOTF 光谱成像仪光学设计

2.1 各分系统的参数分配

光学系统由物镜、准直镜及成像镜组成。晶体选用美国 Brimrose 公司研制的非共线 TeO₂, 晶体尺寸为 10 mm×10 mm, 角孔径为 6°。为保证入射到晶体

上的光束满足角孔径要求,同时要保证衍射光束和入射光束的空间分离,设计要求准直系统的光束发散角要小于 3° , TeO_2 晶体尺寸限制了孔径光阑的尺寸,晶体可接收的角度决定了系统的视场角。根据光学系统的空间不变性,这2个指标决定了光学系统的孔径与视场,它们之间是相互制约的^[6]。

根据上述原理以及综合考虑了物镜、准直镜及

成像镜的像差匹配关系,前置望远镜的倍率选择为1倍关系,这时望远物镜的焦距与准直镜的焦距相等,因为准直镜的后方要放置 TeO_2 晶体,准直镜的瞳又应位于晶体中心,这样使整个系统具有最大的能量利用率。物镜对角线视场角选择为 2.2° ,物镜入瞳直径选择为 $\varphi 10\text{ mm}$ 。根据上述分析,我们选择表1设计参数。

表1 各分系统光学参数

Table 1 Optical parameters of each optics

分系统名称	光学参数			特殊要求
	焦距/mm	F数	视场角/ $^\circ$	
物镜光学系统	50	F/5	2.2	孔径光阑与 TeO_2 晶体中心位置共轭
准直镜光学系统	50	F/5	2.2	
成像镜光学系统	80	F/8	5	准直镜出瞳与成像镜入瞳重合,位于 TeO_2 晶体中心
全系统	80	F/8	2.2	满足图像大于 128×128 个像元的要求(像元大小 $16\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$)

2.2 设计分析

根据以上的参数分配结果,对物镜、准直镜与成像镜光学系统进行初步设计,3个分系统的结构示意图如图3所示。

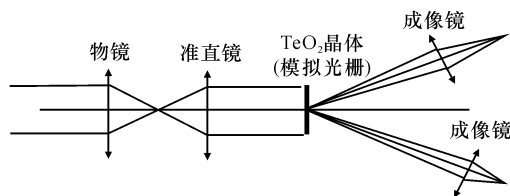


图3 光学系统结构示意图

Fig. 3 The structure of optical system

系统中实际限制能量的为 TeO_2 晶体的口径,由于晶体尺寸的限制,系统的孔径光阑设置在晶体上会使整个光学系统具有最大的能量利用率。但由于声光调制器的原理使得孔径光阑无法设在 TeO_2 晶体上,所以在具体设计中,将孔径光阑设置在物镜系统中,通过准直镜成像在 TeO_2 晶体上形成一个实际限制光束的虚光阑,这样物镜中的孔径光阑就与晶体中心位置共轭。并且准直镜的瞳又位于晶体中心,这样整个系统具有最大的能量利用率。同时物镜、准直镜及成像镜系统既要满足像点匹配的要求又要满足瞳窗匹配的要求,这样确定的准直镜及成像镜都是光阑前置的光学系统。根据像差理论,除了球差、场曲和光阑位置无关以外,慧差、像散、畸变这3种像差都和光阑位置有关。

由于AOTF光谱成像仪的光谱工作波段较宽,从短波的400 nm到长波的900 nm,波段跨度达到了500 nm,而对光谱仪器来说,为了使各波长的光谱图像都有很好的质量,必须消除二级光谱。

为了较好地控制系统的二级光谱,我们采用了偏离P-V图上直线之外的FK类玻璃。

为了实现衍射光与非衍射光的分离,经理论计算分析知收集镜的前置光阑位置要很远($> 280\text{ mm}$)。并且 TeO_2 晶体本身固有的色散性质,O光与E光的折射率 n_o 、 n_e 均为波长的函数,从晶体出射的衍射角实际上是波长的函数,随着波长的变化而变化。在成像过程中就会出现驱动频率改变,引起衍射波长变化和衍射角变化,造成整个视场图像漂移^[7]。所以要求收集镜的视场角不但要满足视场的要求还要求能够接收到各个谱段的光束,这对设计带来一定的难度。

2.3 设计结果

设计采用CODE-V光学设计软件模拟 TeO_2 晶体的多级衍射,在晶体中心即孔径光阑共轭的位置处设置了一块透射式光栅来模拟晶体的偏转^[8],收集镜收集由AOTF产生的正交偏振的正、负一级衍射图像,整个系统对400 nm~900 nm波段进行消色差。整个系统只用了3种光学玻璃,FK类玻璃与KF类玻璃的组合很好地控制了系统的二级光谱。完成一个设计质量在32 lp/mm的空间频率下,光学系统的MTF在0.7以上。

图4所示为AOTF偏振光谱成像仪的光学系统结构图。最前方的光学元件为截止滤光片,限制进入光学系统的谱段范围,物镜由复杂化的三片式实现,设计结果为三组五片,收集镜由复杂化的目镜结构实现,设计结果为四组六片。

我们对光学系统的设计结果进行了分析评价,

光学系统的点列图(从左到右依次为 400 nm、500 nm, ..., 900 nm)和调制传递函数如图 5 和图 6 所示。

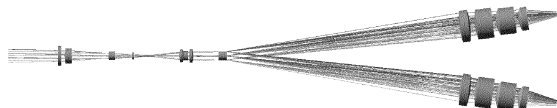


图 4 光学系统结构图

Fig. 4 The structure of the optical system

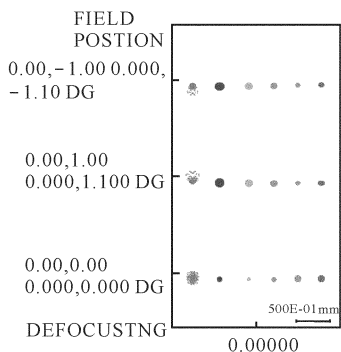


图 5 各波段点列图

Fig. 5 Spot of each wave band

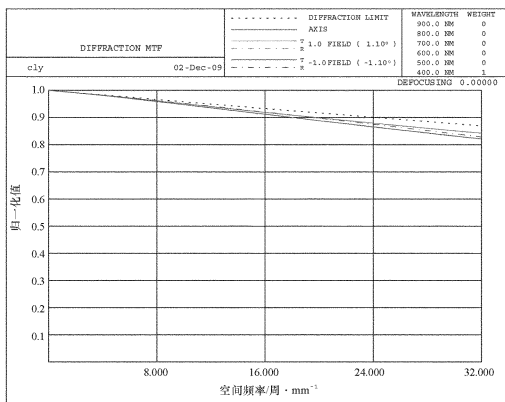


图 6 系统传递函数曲线

Fig. 6 MTF of the system

AOTF 偏振光谱成像仪的光学系统在 32 lp/mm 的设计 MTF 值与 Strehl 比如表 2 所示。

表 2 32 lp/mm 时的设计 MTF 值及 Strehl 比

Table 2 MTF and Strehl ratio for achieving 32 lp/mm design

波段/nm	各视场平均 MTF	Strehl ratio
400	0.833	0.895
500	0.760	0.989
600	0.770	0.992
700	0.750	0.988
800	0.700	0.987
900	0.670	0.986

从各波段系统的点列图和 MTF 数据可以看出,各视场各波段像斑的弥散斑直径基本上都在像元尺寸之内,系统的设计 MTF 均值大于 0.7,接近衍射极限。

3 AOTF 成像光谱仪结构设计

结构设计的目的是实现光学设计的要求。AOTF 光学系统由望远镜、准直镜及采集镜组成。各镜片均采用外框固定并辅以光学对心加工保证光学系统的同轴,所有结构材料均选用高硬度轻质铝合金 LY12-CZ,既能降低整个系统的质量又能保证结构件的刚度,保证光学系统的稳定性。图 7 所示为成像镜组机械结构图,每组镜子采用各自对心加工的镜片框固定后再装入对心加工的镜筒内。

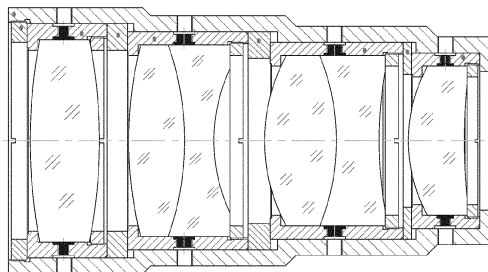


图 7 成像镜组机械结构

Fig. 7 Mechanical structure of imaging lens assembly

光学镜片的固定框上各开有一定数量的注胶小孔,在每组镜片安装好后注入 XM-31 胶,既能防止光学件的松动,又能应对恶劣的使用环境。

采集镜采用传统的镜片安装方式。通过各个对心加工的镜片固定框,以及在光学装配时适当修研隔圈来保证光学系统的像质。

各片光学玻璃均由各自独立的镜框固定,如图 8 所示。将玻璃(序号 3)安装在镜框(序号 1)之中,通过压圈(序号 2)压紧并从镜框的注胶孔注入固定用胶(序号 4),在胶固化并确认玻璃无应力安装的状态下,通过专用的对心车床,找出玻璃的光轴,以光轴作为基准 A,加工镜框的外圆面及端面,保证各组镜框的外圆和镜筒的间隙小于 0.01 mm,这样,就能保证光学系统的同轴度优于 0.01 mm。

通过研磨各镜组间的调整垫片厚度,保证了各镜片的光学间隔误差优于 0.005 mm。这样的误差值均在光学设计的容许范围之内,从而实现了高精度光学镜头的装调。

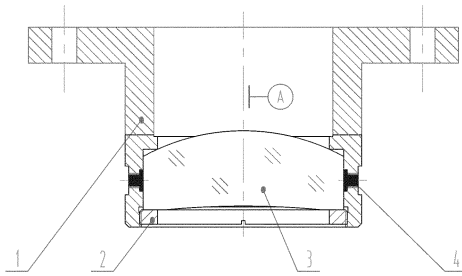


图8 对心加工机械结构

Fig. 8 Mechanical structure of centering part

4 结论

近年来,光谱成像技术在军事侦察、精细农业、生物医学等领域的广泛应用前景引起了愈来愈多研究者的关注,同时具备空间分辨能力和光谱分辨能力的光谱成像技术是图像分析技术与光谱分析技术的完美结合。设计并研制了一种应用于AOTF成像光谱仪原理样机的光机系统,该光学系统在工作谱段范围400 nm~900 nm内具有消色差并达到衍射极限。通过优化设计可用于AOTF成像光谱仪的光机系统(采用三组镜头组合而成),各镜片均采用外框固定并辅以光学对心加工,保证光学系统的同轴。实验验证表明,该光机系统满足AOTF成像光谱仪原理样机成像要求,像质良好。

参考文献:

- [1] 刘石神. 声光可调谐滤波器及其在成像光谱仪上的应用[J]. 红外, 2004(07):12-17.
LIU Shi-shen. Acousto-optic tunable filter and the application of imaging spectrometer [J]. Infrared, 2004, 7:12-17. (in Chinese with an English abstract)
- [2] DELWICHE S R, KIM M S. Hyper spectral imaging detection of scab in wheat[J]. SPIE, 2000, 4203:13-20.
- [3] STAMATAS G N, BALAS C J, KOLLIAS N. Hyperspectral image acquisition and analysis of skin [J]. SPIE, 2003, 4959:77-82.
- [4] 江益, 曾立波, 吴琼水. 基于声光可调谐滤波器的显微光谱成像技术[J]. 光学技术, 2005, 31(2):193-195.
JIANG Yi, ZENG Li-bo, WU Qiong-shui. Microscopic spectral imaging based on an acousto-optic tunable filter [J]. Optical Technique, 2005, 31(2):193-195. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 常凌颖, 赵葆常, 邱跃洪. 声光可调谐滤波器(AOTF)消色差设计[J]. 光子学报, 2009, 38(11):2895-2899.
CHANG Ling-ying, ZHAO Bao-chang, QIU Yue-hong. Eliminate chromatic aberrations for acousto-optic tunable filter [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(11): 2895-2899. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:科学出版社, 1983.
YUAN Xu-chang. Optical design [M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese)
- [7] SUHRE D R. White-light imaging by use of a multiple pass band acousto-optic tunable filter [J]. Applied Optics, 1996, 35(22):4494-4501.
- [8] DESLIS A, KURZWEIL C G, LABAW C C. Optical design of an imaging spectrometer utilizing an acousto-optic tunable filter as a disperser [J]. SPIE, 1998, 3482:170-178.