

一种用于超光谱成像系统中消高级次光谱集成滤光片的设计与研制

段微波, 李大琪, 余德明, 刘保剑, 刘定权

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:介绍了一种用于工作波段 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 超光谱成像系统中消高级次光谱集成滤光片的设计与研制. 针对 offner 凸面光栅分光的工作特点, 通过在同一光学基片上划分三块不同的几何区域, 分波段实现超光谱成像仪全光谱范围内因光栅分光引起高级次光谱的抑制与消除, 同时保证工作波段的光学效率优于 93%. 采用精细掩模技术, 保证不同波段之间过渡区域的尺寸小于 $30 \mu\text{m}$, 有效提高光谱利用效率.

关键词:超光谱成像; 光栅分光; 高级次光谱; 集成滤光片

中图分类号: TB43 **文献标识码:** A

Design and fabrication of an integrated order blocking filter for hyperspectral imaging system

DUAN Wei-Bo, LI Da-Qi, YU De-Ming, LIU Bao-Jian, LIU Ding-Quan

(Department of Optical Coatings & Materials, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: An integrated order blocking filter covering the wavelength range from $0.4 \mu\text{m}$ to $2.5 \mu\text{m}$ was designed and fabricated for the hyperspectral imaging system. Based on the characteristics of the reflective Offner convex grating dispersion, the optical substrate is divided into three areas with different working band to block the high-level spectra. The optical transmittance efficiency of each band is higher than 93%. Fine mask technique was adopted to ensure the size of adjacent area between different band less than $30 \mu\text{m}$. The spectra utilization efficiency is improved effectively.

Key words: hyperspectral imaging, grating dispersion, high-level spectra, integrated filter

PACS: 42.79.Fm

引言

超光谱成像技术是一种图谱合一的空间信息获取技术, 能够同时探测目标的空间几何特征信息和空间像元色散形成的几十个甚至几百个波长的连续光谱信息. 成像光谱仪将传统的二维成像遥感技术与光谱仪技术有机地结合在一起, 在获取观测对象二维空间信息的同时, 在连续光谱波段上对同一地物分光谱成像^[1]. 由于光谱图像数据中每一像元含有与被观测物体组分有关的光谱信息, 能直接反映出物体的光谱特征, 从而可以揭示各种目标的光谱

特性、存在状况以及物质成分, 使得从空间直接识别目标特征成为可能^[2]. 随着成像光谱遥感应用技术的发展, 对于仪器光谱分辨率的要求越来越高, 从多光谱向超光谱发展成为成像光谱仪的趋势, 光谱范围覆盖紫外到长波红外波段, 波段数从单一波段发展到几十上百个通道^[3].

为了实现航天遥感用超光谱成像系统高分辨率、高信噪比、小体积、轻量化的技术要求, 同时考虑消相差的因素, 双离轴球面反射镜配合三角形 offner 凸面光栅是常用的分光模式^[4-5]. 三角形 offner 凸面光栅相比于 laminar 光栅具有更高的衍射效率, 可实

收稿日期: 2015-11-23, 修回日期: 2016-04-01

基金项目: 中国科学院青年创新促进会人才培养计划(2013160)

Foundation items: Supported by Youth Innovation Promotion Association Chinese Academy of Sciences (2013160)

作者简介 (Biography): 段微波 (1981-), 男, 湖北襄阳人, 研究员, 主要从事光学薄膜的设计、制备及应用研究. E-mail: dwbuser@sina.com

Received date: 2015-11-23, revised date: 2016-04-01

现更高的信噪比,其光路图见图 1 所示。

然而,波长为 λ_x 的采样光谱的 2 级光谱衍射角与波长为 $2k\lambda_x$ ($k=1,2,3\cdots$) 的 1 级光谱衍射角相同,其会在光谱仪的相同空间位置交叠,对光谱信息的获取造成干扰^[6]。因此必须对光谱仪的高级次光谱衍射效率进行分析并采用相应的措施进行抑制。通常高级次光谱的抑制采用在探测器焦面前放置一片前截止滤光片来,实现光谱仪工作波段外,探测器响应波长内高级次光谱干扰的抑制。然而随着光谱仪光谱范围的拓宽,工作波段($\lambda_s \sim \lambda_L$)长、短波端的波长比值 λ_L/λ_s 可能会大于 2,即 $\lambda_L/2 \geq \lambda_s$,这样 $\lambda_L/2$ 波长既是光谱仪的有效工作波长,又是 λ_L 波长高级次光谱的来源。宽波段超光谱成像系统工作波段内光栅高级次光谱的抑制,是超光谱成像技术应用必须解决的技术问题。

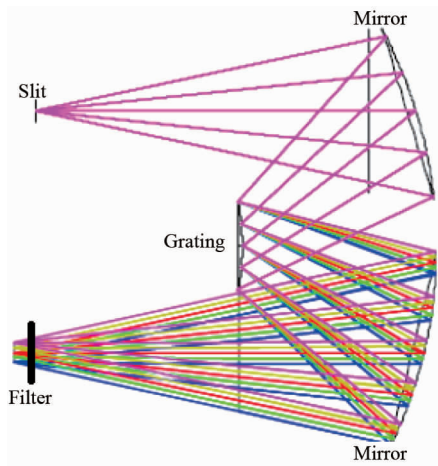


图 1 光栅分光超光谱成像仪结构图
Fig. 1 Structure of grating dispersion hyper-spectral imager

鉴于消高级次光谱滤光片在超光谱成像系统中的重要作用,国内外相关机构均开展了此方面的研究工作。在国外,2011 年芬兰 SPECIM 公司发布的 OBF 滤光片产品,利用两个区域实现工作波段覆盖 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 光栅高级次光谱滤光片的抑制,过渡区域的控制为 $45 \mu\text{m}$;在国内,消高级次光谱滤光片主要还是以单一区域的前截止为主,2009 年中国科学院上海技术物理研究所兰卫华博士介绍了凸面光栅衍射效率计算及二级光谱抑制的方法^[7-8]。不管是国内还是国外,目前消高级次光谱滤光片工作波段主要集中在可见近红外波段,波段划分也不超过两个,与本文所述超光谱系统的应用要求存在一定差距,需要针对性进行设计与研制。

1 消高级次光谱滤光片结构与膜系设计

1.1 光栅分光与高级次光谱干扰

衍射光栅的光谱是焦面上一条条亮而又窄的条纹,这些条纹的位置随入射光波长而变,因此包括有不同波长的复色光波经过光栅后,其中每一种波长都形成各自一套条纹,且彼此分开一定的距离,借此可以区分入射光波的光谱组成,这就是光栅的分光作用。对于反射型三角光栅,如图 2 所示,其光栅方程为:

$$d(\sin\theta_i - \sin\theta_d) = m\lambda \quad , \quad (1)$$

其中, d 为相邻刻线间距; m 为衍射级次; θ_i 为光线入射角; θ_d 为光线反射角。

由光栅方程可知,除零级以外,不同波长的同一级主极大对应不同的衍射角,这就是光栅分光的基本原理。

对光栅方程两边取微分可得:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos\theta} \quad , \quad (2)$$

这表明光栅的角色散与光栅常数 d 成反比,与级次 m 成正比。

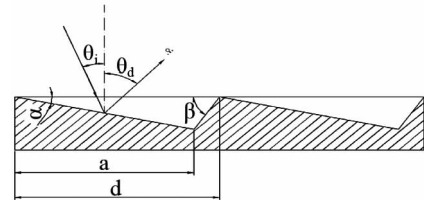


图 2 反射型三角闪耀光栅
Fig. 2 Reflective triangular shine grating

然而,当进入光栅的光谱范围较宽时,相同光栅衍射角对应着多个级次的光谱信息,不同波长的光谱信息在同一位置混叠,造成系统信噪比的下降。

1.2 消高级次光谱集成滤光片波段划分

针对光栅分光的特点,对于光谱覆盖较宽的光栅分光类光学系统,可在光学系统的焦面或探测器的前表面设置消高级次光谱集成滤光片来实现高级次衍射光谱的抑制。

消高级次光谱集成滤光片的技术方案为在同一个光学基片上,划分相应的几何区域分别实现不同工作波段高级次光谱的抑制和消除,划分的区域数 n 的确定方法如下:

$$n = [\log_2(\lambda_L/\lambda_s)] + 1 \quad , \quad (3)$$

式中: λ_L 和 λ_s 分别为光谱波段的最长波长和最短

波长; [] 为取整符号;

各几何区域高级次光谱的抑制谱段划分确定方法如下:

第 1 区域谱段波长范围: $\lambda_S \sim \lambda_1, \lambda_1 \leq 2\lambda_S$;

第 2 区域谱段波长范围: $\lambda_1 \sim \lambda_2, \lambda_2 \leq 2\lambda_1$;

.....

第 $n-1$ 区域谱段波长范围: $\lambda_{n-2} \sim \lambda_{n-1}, \lambda_{n-1} \leq 2\lambda_{n-2}$;

第 n 区域谱段波长范围: $\lambda_{n-1} \sim \lambda_L$.

光谱仪的工作波段为 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 根据消高级次光谱集成滤光片几何区域的划分方式结算可得, 其划分区域数:

$$n = [\log_2(2.6/0.4)] + 1 = 3 \quad (4)$$

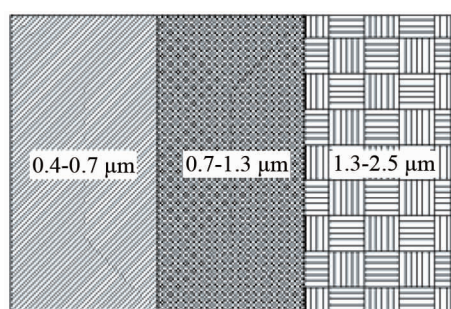


图 3 消高级次光谱集成滤光片光谱与几何区域划分图

Fig. 3 Spectral and geometric region partition of OBF integrated filter

1.3 消高级次光谱集成滤光片膜系设计

光学薄膜元件的工作波段是薄膜材料选择的重要依据^[9]. 光学薄膜材料的制备工艺是保证良好薄膜性能的关键因素. 从薄膜沉积前的膜料状态、基片清洗工艺、沉积方法选择, 到薄膜沉积过程中各种工艺参数如沉积速率、衬底温度、背景气体压强等都对薄膜性能有着重要的影响^[10]. 在可见到短波红外波段, 常用作低折射膜料的低吸收介质薄膜材料包括有限的几种氧化物和氟化物材料 (SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgF_2), 常用作高折射膜料的低吸收介质薄膜材料主要为几种氧化物材料 (ZrO_2 、 HfO_2 、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、 Nb_2O_5 和 Y_2O_3)^[11]. 综合考虑材料折射率, 应力匹配, 理化特性等因素, 选择 Nb_2O_5 和 SiO_2 分别作为高、低折射率材料 (分别用 H 和 L 表示), 进行滤光片的设计与制备.

对于三个子滤光片单元膜系的设计, 首先按照 (0.5H L 0.5H) 结构给出初始膜系, 根据光谱截止深度选定膜堆周期, 并在规整膜层两侧交替添

加高低折射率材料, 利用薄膜自动设计软件, 给出目标值对滤光片透射波段进行光谱优化, 得到设计结果. 图 4 ~ 图 6 给出了三个子滤光片单元设计光谱曲线.

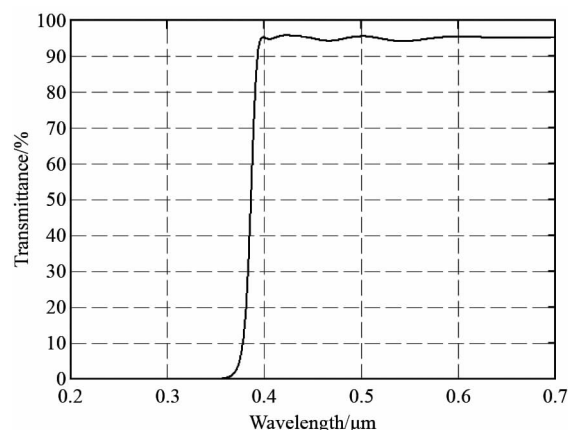


图 4 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 波段子滤光片设计光谱曲线

Fig. 4 Designed spectrum curve of $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ subelement filter

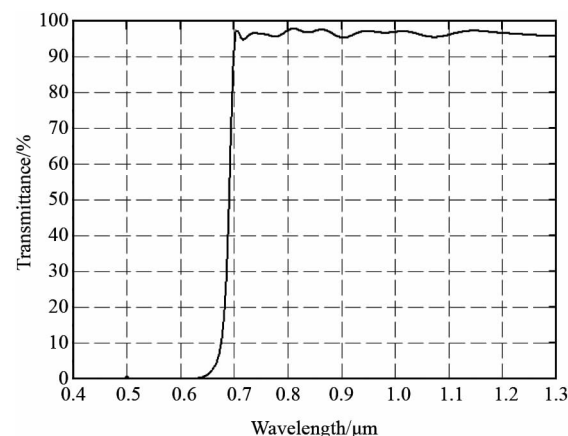


图 5 $0.7 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 波段子滤光片设计光谱曲线

Fig. 5 Designed spectrum curve of $0.7 \sim 1.3 \mu\text{m}$ subelement filter

2 消高级次光谱集成滤光片的研制

2.1 薄膜沉积系统介绍

滤光片膜层制备在 Leybold ARES1110 型真空镀膜设备上完成. 该设备由真空系统, 薄膜沉积系统和膜层厚度控制系统三部分构成. 真空系统选用了机械泵 + 罗茨泵 + 油扩散泵的配置; 薄膜沉积系统包括两把 E-beam 电子枪和 4 组电阻蒸发源, 外加 APS (Advanced Plasma Source) 离子辅助源; 膜层厚度监控由 6 位可切换探头石英晶体振荡控制器和

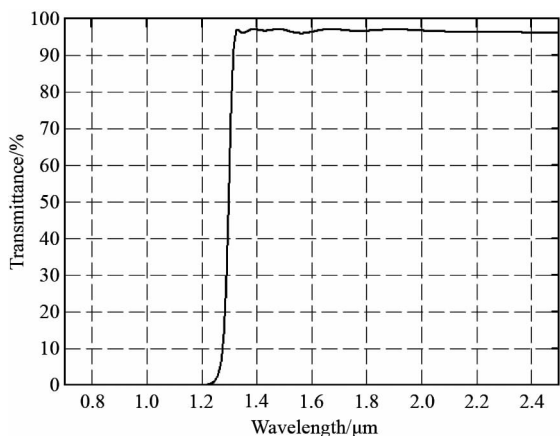


图6 1.3 ~ 2.5 μm 波段子滤光片设计光谱曲线
Fig.6 Designed spectrum curve of 1.3 ~ 2.5μm subelement filter

OMS5000 光学监控系统构成.

2.2 掩模板的设计与配准

光栅分光特点,决定了光谱沿色散方向连续分布,因此消高级次光谱集成滤光片上沿波段排布方向上分布着光谱信息(包括波段与波段之间的过渡区域),为了实现光谱的高效利用,对集成滤光片上波段之间过渡区域的控制显得尤为重要^[12].

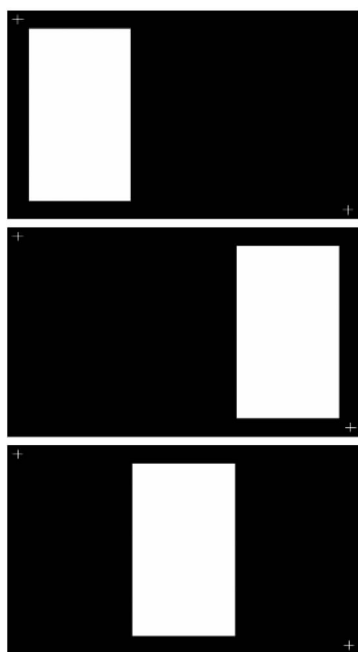


图7 掩模板结构示意图
Fig.7 The structure of mask sheets

综合考虑集成滤光片膜层制备的高温环境、滤光片光学表面质量、掩模配准精度等因素,机械掩模是更好的方案.掩模板设计如图7所示,掩模板材质

为 10μm 厚镍片,采用激光打标机进行图形刻划,定位精度可达 ± 5μm,掩模板和光学基片对角线设计十字刻线,实现两者精确配准.

2.3 各波段消高级次光谱滤光片单元工艺控制

滤光片基片为光学蓝宝石,其在近紫外到短波红外波段都有很好的光学透过率.基片与各波段单元消高级次光谱滤光片掩模板配合后固定,放进真空室进行各单元滤光片的制备.真空度达到 9×10^{-5} mbar 开工件转动,并对基片进行烘烤,烘烤温度 250℃,保温 2 h.

滤光片制备前十分钟,向离子源充入 30 sccm 氧气,真空室真空度保持在 $1.5 \sim 2.0 \times 10^{-4}$ mbar,并打开离子源. Nb₂O₅ 和 SiO₂ 材料的蒸发速率分别控制在 1.8 Å/s 和 8.0 Å/s.各滤光片子单元镀制完成后,依次关闭离子源、基片烘烤和工件转动,待滤光片自然降温至 100℃ 以下,打开真空室,并进行下一滤光片单元镀制的准备,依次往复直至三个波段滤光片子单元制备完成.

3 消高级次光谱集成滤光片的测试与分析

3.1 滤光片光谱测试

样品的透射率光谱曲线由 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda900 光谱测试仪获得(仪器的透射率测量精度为 ± 0.05%,波长分辨率为 1 nm),测量范围为 200 ~ 2 500 nm,测量时光线垂直入射样品.

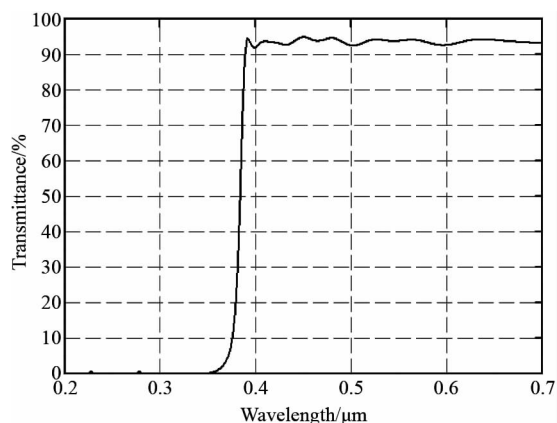


图8 0.4 ~ 0.7 μm 波段子滤光片实测光谱曲线
Fig.8 Measured spectrum curve of the 0.4 ~ 0.7μm subelement filter

图8 ~ 图10 给出了集成滤光片三个子滤光片单元的实测光谱曲线.从图上可以看出,各单元滤光片在透射波段的平均透过率在 93% 以上,截止波段的截止深度优于 OD3,与设计光谱有较好的吻合

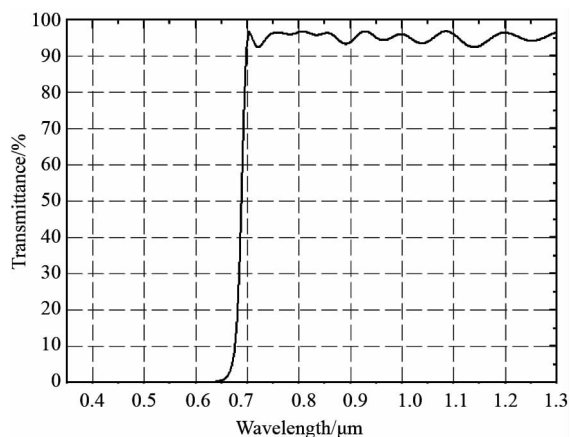


图9 0.7~1.3 μm 波段子滤光片实测光谱曲线
Fig.9 Measured spectrum curve of the 0.7~1.3 μm sub-element filter

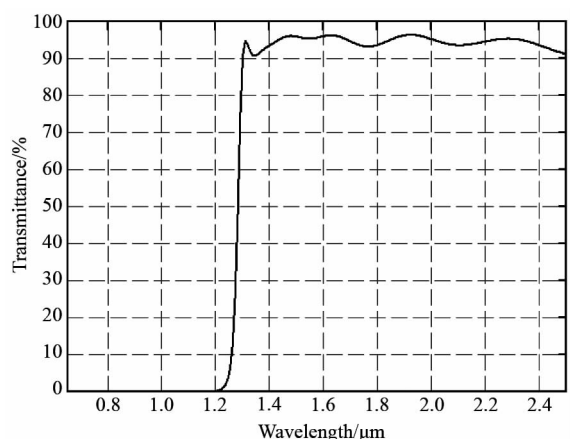


图10 1.3~2.5 μm 波段子滤光片实测光谱曲线
Fig.10 Measured spectrum curve of the 1.3~2.5 μm sub-element filter

度.其具体测试结果见表1所示.

表1 集成滤光片光谱测试数据表

工作波段	平均透过率	截止波段	平均截止透过率/%
0.4~0.7 μm	93.3%	0.2~0.35 μm	0.1
0.7~1.3 μm	94.5%	0.35~0.65 μm	0.05
1.3~2.5 μm	93.1%	0.7~1.25 μm	0.07

3.2 通道之间过渡区域的测试与分析

光栅分光在光谱上连续分布,集成滤光片有效通光口径内分布着工作波段的光谱,不同几何区域的过渡区也包含着重要的光谱信息,过渡区域的控制是衡量集成滤光片水平的重要指标,有必要对其几何尺寸进行精确标定.采用日本 OLYMPUS 公司生产的 STM7 型读数显微镜对过渡区域进行显微测

量,目镜为 MM6-OCC10 \times 带十字刻线,物镜有 5 \times 、10 \times 、20 \times 、50 \times 四个放大倍率可调.先选择 5 \times 物镜进行初对准和调焦,然后利用 50 \times 物镜进行精确对焦测量,得到的过渡区域显微照片如图 11 所示.



图11 滤光片过渡区域显微照片
Fig.11 Micrograph of the adjacent area

3.3 滤光片的可靠性分析与验证

集成滤光片的可靠性验证依据 QJ1697-89“红外干涉滤光片通用技术条件”进行各项试验,并结合超光谱成像系统轨道条件和在轨寿命对试验进行补充和加强.具体试验条件和试验结果如下表 2 所示.

表2 集成滤光片可靠性试验条件表
Table 2 Reliability test condition of the filter

试验项目	试验条件	试验结果
浸泡试验	在 45 $^{\circ}\text{C}$ 纯水中浸泡 8 h.	通过
附着力试验	采用标准聚酯胶带进行附着力试验,试验时将胶带的胶面牢牢地贴在膜面,排出气泡,迅速拉起胶带的一端.	通过
湿度试验	在温度 45 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度不小于 95% 的环境中,保持 24 h.	通过
温度交变试验	在 45 $^{\circ}\text{C}$ 环境中保持 30 min,再自然降温,在 -10 $^{\circ}\text{C}$ 环境中保持 30 min,后自然升温到 45 $^{\circ}\text{C}$,完成一个循环,共进行 3 次循环.	通过
低温冲击试验	将处于室温状态的样品浸入液氮中,保持 5 min,取出后自然升温,待温度平衡后保持 15 min,完成一个循环,共进行 3 次循环.	通过
紫外辐照试验	集成滤光片位于光学系统后光路,紫外辐照来源主要是地球表面反射太阳辐照,且经过多个光学元件衰减,经计算 2100 ESH 剂量是合理的,试验按照 3 倍太阳常数加速进行.	通过
Co60 γ 辐照试验	按照 700 km 轨道,8 年寿命计算,并保证一定设计余量,总辐射剂量 40 krad(Si).	通过

4 结论

针对光栅分光产生高级次光谱对超光谱成像系统的影响,结合超光谱成像系统结构,提出通过在一块光学基片上划分不同的几何区域分别对特定工作

(下转第 441 页)