

短中波红外长线阵拼接集成滤光片技术研究

王润福¹, 王多书^{2*}, 范 栋³, 李 晨³, 王济洲³, 董茂进³

- (1. 兰州空间技术物理研究所 空间环境材料行为及评价技术重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 空间光谱成像技术的发展使得探测器阵列与分光元件的集成成为一种趋势, 长线阵拼接集成滤光片是空间多光谱成像仪实现焦平面集成分光的关键器件, 在我国空间多光谱成像光学系统中需求明显。设计了 4 通道短中波红外长线阵拼接集成滤光片, 采用离子束辅助轰击的电子枪蒸发方法制备了各通道窄带滤光片, 利用专门研制的工装探索了拼接工艺, 研制出了短中波红外长线阵拼接集成滤光片。测试结果表明: 集成滤光片各通道平均透射率达到 90%, 最小带宽为 230 nm (中心波长为 4.95 μm), 光谱性能与设计结果吻合, 满足性能指标要求。最小拼接宽度仅为 10 μm , 拼接不平行误差为 1 μm , 集成滤光片设计结构和拼接强度能够耐受抗振性试验。该集成滤光片已经在空间光学遥感仪器上成功应用。

关键词: 长线阵拼接集成滤光片; 短中波红外; 空间光谱成像; 光学薄膜

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210463

Research on splicing integrated filter technology of short/medium infrared long line array

Wang Runfu¹, Wang Duoshu^{2*}, Fan Dong³, Li Chen³, Wang Jizhou³, Dong Maojin³

- (1. Science and Technology on Material Performance Evaluating in Space Environment Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;
2. Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;
3. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The development of spatial spectral imaging technology makes the integration of detector array and light splitting elements become a trend. The long line array splice integrated filter (LLASIF) is the key device of spatial multispectral imager to realize concentrated light splitting at focal plane, and it has obvious demand in the spatial multispectral imaging system in China. In this paper, a 4-channel short/medium infrared LLASIF was designed. The narrow band filter of each channel was prepared by electron gun evaporation method assisted by ion beam. The splicing process was explored by using specially developed tools and the LLASIF was developed. The test results show that the average transmittance of each narrow band filter reaches 90%, the minimum bandwidth is 230 nm (central wavelength is 4.95 μm), and the spectral performance is consistent with the design results and meets the performance requirements. The minimum seam width is only 10 μm , the seam parallelism error is 1 μm . The integrated filter structure and splicing strength can withstand the vibration resistance test. The

收稿日期: 2021-08-15; 修订日期: 2021-10-11

作者简介: 王润福, 男, 研究员, 硕士, 主要从事空间材料应用及评价技术研究。

通讯作者: 王多书, 男, 研究员, 博士, 主要从事空间光学薄膜技术研究。

integrated filter has been successfully applied in space optical remote sensing instrument.

Key words: long line array splice integrated filter; short/medium infrared band; spatial multispectral imaging; optical thin film

0 引言

组成地物的原子分子会在能量、电磁场等作用下发生能级跃迁,进而辐射或者吸收某些特征频率的红外线,因而地物发射和反射的红外线携带有地物的特征信息。空间光学遥感探测就是利用卫星等空间平台获取有用的红外线特征信息,进而实现对地物的探测与识别^[1]。空间光学遥感探测在地球资源探测、海洋监测、天气预报、灾害预报以及军事侦查等方面有广泛的应用^[2]。

一般情况下,能在大气中有效传播的光学窗口主要包括以下 4 个波段:(1) 300~1 300 nm 波段,该波段主要包含地面物体的反射光谱,包括部分紫外、全部可见光以及部分近红外波段。紫外波段含有大气成份变化的信息,可用于分析紫外光在大气中的传播特性、臭氧层动态变化以及局部大气成份的突变等,由此可检测大气臭氧层破坏情况以及高速移动物体的冲击波特性等。可见光波段包含了气象、地矿成份及农作物生长态势等方面的大量信息,主要用于地表植物类别区分以及生长态势研判等,同时,可对不同土壤和地理环境边界进行界定;(2) 1 300~2 500 nm 短波红外波段,该波段主要包含了地物反射谱信息;(3) 2 500~4 200 nm 中波红外波段,主要包含了较丰富的地物热辐射谱和反射谱信息;(4) 8 000~14 000 nm 长波红外波段,该波段所含光谱信息主要是地物热辐射谱。红外波段包含了非常丰富的地物信息,因而,在空间遥感中应用也很广泛,如:火山活动情况监测、地热探测、地下水探测、农作物长势及早情评估、土壤温度及含水量监测、地质构造探测、环境污染监测等^[3]。另外在军事领域,还可用于伪装识别、火灾监测、高温目标探测以及军事活动监测等^[4]。

空间光谱成像技术将传统的光学成像与地物光谱分析结合在一起,可以实现对同一区域同时获取多个波段的地物反射或热辐射光谱图像,波段数越多图像信息量越大,因而通常称作“像立方”。通过增加分光通道可以获得更多的波段数,“像立方”所包含的信息量也会显著增加,因而光谱成像技术是未来重点发

展的空间光学遥感技术。典型的空間光谱成像系统主要有多光谱成像仪、高光谱成像仪以及超光谱成像仪等^[5]。

分光装置是成像光谱仪的核心部件之一,主要有滤光片、光栅以及迈克尔逊干涉仪等。滤光片分光相对简单,通常在光路中设置单片滤光片实现分光,受限于成像光谱仪尺寸,滤光片分光很难获得较多的通道数。随着光谱成像技术的不断发展,采用单片滤光片分光的方法已不能满足使用要求,集成滤光片应运而生。集成滤光片是将单片滤光片小型化后集成(拼接或同基片不同膜堆)在一起,再在成像仪焦平面处与探测器集成,进而实现多路集中分光。对应于探测器的不同规格,集成滤光片主要有长线阵集成滤光片和大面阵集成滤光片。长线阵拼接集成滤光片是目前实现了空间应用的一种形式^[6-13]。短波与中波红外波段是空间光谱成像的重要窗口,综合分析国内外空间多光谱成像系统发现:波段 1.55~1.75 μm (SW1)、2.08~2.35 μm (SW2)、3.5~3.9 μm (MW1) 及 4.85~5.05 μm (MW2) 是常用的短波及中波红外通道,这 4 个通道的集成滤光片也是该波段比较典型的一种。由于该波段可用材料较少,光谱要求较高,短中波红外长线阵拼接集成滤光片的研制难度较大。论文针对该问题,开展了短中波红外拼接式集成滤光片技术研究。

1 长线阵拼接集成滤光片设计

与单片滤光片不同,集成滤光片不仅要考虑各通道窄带滤光片的研制,还要将各窄带滤光片集成在一起,因而,其设计也要从集成结构设计和窄带滤光片设计两个方面考虑。

1.1 集成结构设计

从目前空间拼接集成滤光片发展现状来看,其集成方式主要有有衬底拼接和无衬底拼接两种。有衬底拼接是将研制好的窄带滤光片并排粘接在同一衬底上,由于有衬底加持,其机械强度高,抗发射振动性好(抗振性),但衬底的双面反射以及粘接胶的吸收会引起通道透射信号强度减弱,光学系统信噪比下降。

实际应用中还存在另一不利因素, 国产粘接胶在该波段吸收较大, 导致有衬底拼接方式在国内应用几乎不可行。无衬底拼接避免了衬底和粘接胶对于透射信号的影响, 但机械强度能否耐受发射过程中的振动破坏并没有验证过, 国内外也没有空间应用的先例。为此, 在没有合适国产粘接胶的情况下, 笔者研究了采用无衬底拼接方式实现窄带滤光片的集成。

窄带滤光片基片材料的选择非常关键, 该波段空间常用的基片材料主要有硅 (Si)、硫化锌 (ZnS) 和硒化锌 (ZnSe) 等, 从机械强度、透光性能、各通道窄带滤光片膜系设计与制备的难易程度等综合考虑, Si 材料是比较合适的选择。在光学系统焦平面处集成滤光片与探测器阵列粘接在一起, 探测器阵列尺寸是设计集成滤光片尺寸的主要依据, 长线阵探测器四组像元阵列尺寸均为 23.5 mm×0.5 mm (长×宽), 相邻像元阵列中心线间距为 1.36 mm, 考虑到像元阵列覆盖性、斜入射光影响以及拼接工艺需要, 集成滤光片设计成图 1 所示的长条状结构。各窄带滤光片尺寸为: SW1 和 MW2 相同, 长×宽×高: 29.5 mm×1.63 mm×1.2 mm; SW2 和 MW1 相同, 长×宽×高: 29.5 mm×1.36 mm×1.2 mm, 按照 SW1、SW2、MW1、MW2 的顺序沿侧面拼接而成。由于粘接胶并非完全不透光, 因而, 拼缝的存在会漏入杂光, 拼缝宽度的选择就非常关键, 拼缝越窄杂光越弱, 但拼缝过窄因用胶量不够会引起粘接强度降低, 不能满足抗振性要求。综合考虑以上因素在保证抗振性条件下拼缝宽度越窄越好, 初步设计成 30 μm, 由后续试验最终确定。窄带滤光片的厚度同样影响集成滤光片的抗振性, 厚度越大抗振性越好, 但会影响成像, 经光路计算分析, 厚度不大于 1.2 mm。

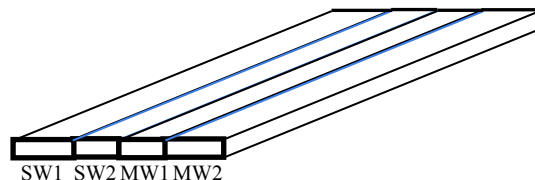


图 1 4 通道短中波红外拼接式集成滤光片结构示意图

Fig.1 Structure diagram of 4-channel short/medim infrared LLASIF

1.2 窄带滤光片设计

综合考虑 4 通道集成滤光片的空间应用现状及国内成像光谱仪的实际需求, 各窄带滤光片光谱性能应满足如表 1 所示的结果。由于现有高性能红外探测器通常工作在 80 K 的低温条件下, 与探测器集成在一起的滤光片温度与探测器接近, 必须考虑低温条件对于其光谱性能的影响。

窄带滤光片设计采用长波通膜系和短波通膜系相结合的方式构建通带, 长/短波通膜系分别选择周期性对称膜系结构 $(0.5 HL0.5 H)^m$ 和 $(0.5 LH0.5 L)^m$, 括号中为一个基本周期, m 为周期数, H 表示高折射率材料膜层, L 表示低折射率材料膜层, 光学厚度均为 $\lambda_0/4$ (λ_0 中心波长)。两种膜系均采用公式 (1) 计算对称膜系等效折射率, 由此确定膜层结构是否能满足通带透射率要求, 并形成主膜系。利用公式 (2) 计算截止范围, 如果主膜系不满足截止宽度要求, 可以增加同结构的匹配截止膜系以展宽截止带。利用公式 (3) 计算截止深度, 确定 m 值。由主膜系和匹配膜系设计形成的规整膜系结构通常无法满足全部光谱指标要求, 需要建立优化函数, 对主膜系部分膜层进行厚度优化, 优化设计后可达到光谱指标要求。上述优化过程可以借助光学薄膜设计软件进行。

表 1 各窄带滤光片低温光谱性能要求

Tab.1 Spectral performance requirements of narrow band filter at low temperature

	SW1	SW2	MW1	MW2
Bandpass	1.55±0.03 μm~ 1.75±0.03 μm	2.08±0.03 μm~ 2.35±0.03 μm	3.5±0.03 μm~ 3.9±0.03 μm	4.85±0.03 μm~ 5.05±0.03 μm
Bandwidth	≥0.2 μm	≥0.27 μm	≥0.4 μm	≥0.2 μm
Average transmittance	≥80%	≥80%	≥75%	≥75%
Rejectness	≤0.5%	≤0.5%	≤0.5%	≤0.5%
steepness	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%
Coefficient of ripple	0.1 T_p	0.1 T_p	0.1 T_p	0.1 T_p

注: T_p 为通带最大透射率。

$$E = \frac{n_p^2 \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{n_p}{n_q} + \frac{n_q}{n_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{n_p}{n_q} - \frac{n_q}{n_p} \right) \sin \delta_q \right]}{\sqrt{\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{n_p}{n_q} + \frac{n_q}{n_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{n_p}{n_q} - \frac{n_q}{n_p} \right) \sin \delta_q}} \quad (1)$$

式中: E 为基本周期膜系 (膜层顺序为 pqp) 的等效折射率; p 和 q 表示膜层; n_p 和 n_q 为两种材料的折射率 (上述两种膜系统一表示); δ_p 和 δ_q 为两种材料膜层的相位厚度。

$$\Delta g = 1 \pm \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \quad (2)$$

式中: Δg 为单个反射膜堆的相对半宽度, 与膜堆中心波长的 2 倍相乘, 可近似得到该膜堆的截止宽度; n_H 和 n_L 分别为高、低折射率材料的折射率。

$$T_r = \frac{16n_0n_s}{\left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2m} \left\{ (n_0 + n_s)^2 + \left[\left(\frac{n_0n_s}{n_H} \right) - n_H \right]^2 \right\}} \quad (3)$$

式中: T_r 为截止带透射率; n_0 和 n_s 为入射介质和基底的折射率。

对于在低温环境下应用的窄带滤光片, 因为膜层材料的折射率存在温度色散效应, 环境温度改变后材料折射率会发生变化, 在设计过程中需要提前试验确定低温条件下材料的折射率。采用单层膜测试膜层材料的折射率, 利用其透射率光谱可以反演计算出折射率^[14]。研究过程中, 将试验制作的单层膜样品置于光谱仪的低温杜瓦中, 测得低温条件下样品的透射率光谱, 并由此反演出低温折射率^[15]。利用低温折射率可以设计得到低温条件下膜系的透射率光谱。通常情况下, 实际镀制过程中方便测试的往往是常温光谱, 因而, 通带位置会有一定量的偏移, 可事先试验测得膜系通带位置的低温偏移量, 并由此计算得到低温透射率光谱。

(1) SW1 窄带滤光片设计

该波段探测器在波长大于 2.8 μm 后不再响应, 要求除通带外 2.8 μm 之前的光波全部截止, 基片 Si 在 1.2 μm 前不透明, 其余光波须由膜系截止。根据该通带范围的透明特性及机械特性, 膜层材料选择高折射率 ZnS 和低折射率氟化钇 (YF₃)。利用试验测得的两种膜层材料低温折射率 (80 K) 进行设计计算, 结果显示长波通膜系只采用主膜系即可满足截止区要求, 在

周期数 $m=12$ 时能够满足截止深度、陡度等指标要求。短波通膜系需要一个主膜系外加一个结构相同的辅助截止膜系可满足截止区要求, $m=11$ 时可满足截止深度、陡度等指标要求。最终设计膜系结构为: 空气 |(0.5 HL0.5 H)¹²|基片|1.77(0.5 LH0.5 L)¹¹(0.5 LH0.5 L)¹¹|空气, 长波通膜系 λ_0 为 1.32 μm , 短波通膜系 λ_0 为 2.0 μm 。采用光学薄膜设计软件 Essential Macleod 进行膜系结构局部优化后长/短波通膜系合成光谱透射率曲线如图 2, 通带范围 1.552~1.755 μm , 通带平均透射率 90.4%, 带宽 0.203 μm , 陡度 2.4%, 截止深度 0.5%, 波纹幅度 0.1 T_p 。分别采用常温和低温折射率计算光谱, 结果显示相对于常温条件 80 K 条件下通带位置向短波方向偏移, 半功率点位置偏移量分别为短波侧 20 nm, 长波侧 15 nm。

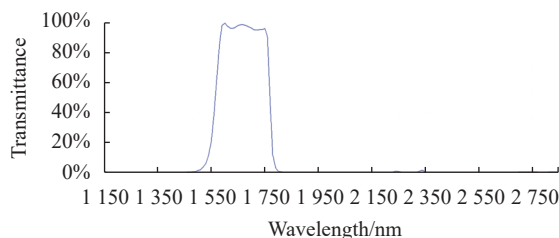


图 2 1.55~1.75 μm 窄带滤光片透射率光谱设计曲线

Fig.2 Transmission spectrum design curve of 1.55-1.75 μm narrowband filter

(2) SW2 窄带滤光片设计

探测器同前, 除通带外 2.8 μm 之前的光波要全部截止。膜层材料选择 ZnS 和 YF₃。利用试验测得的低温折射率进行计算, 结果显示长波通膜系须由一个主膜系外加一个同结构的辅助截止膜系才能满足截止区要求, 当 $m=12$ 时能够满足截止深度、陡度等指标要求。短波通膜系只需要一个主膜系即可满足截止区要求, $m=11$ 时可满足截止深度、陡度等指标要求。最终设计膜系结构为: 空气 |0.77(0.5 HL0.5 H)¹²(0.5 HL0.5 H)¹²|基片|(0.5 LH0.5 L)¹¹|空气, 长波通膜系 λ_0 为 1.80 μm , 短波通膜系 λ_0 为 2.69 μm 。采用 Essential Macleod 进行膜系结构局部优化后合成光谱透射

率曲线如图 3, 通带范围为 2.08~2.352 μm , 通带平均透射率为 91.0%, 带宽为 0.272 μm , 陡度为 2.3%, 截止深度为 0.4%, 波纹幅度为 0.08 T_p 。采用常温和低温折射率计算光谱, 结果显示: 低温通带位置向短波方向偏移, 偏移量为短波侧 25 nm, 长波侧 15 nm。

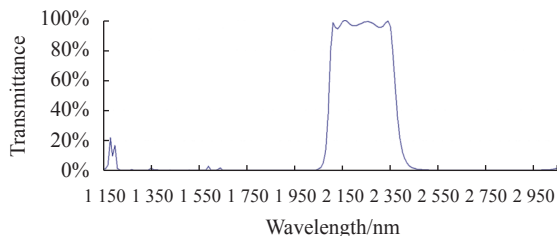


图 3 2.08~2.35 μm 窄带滤光片透射率光谱设计曲线

Fig.3 Transmission spectrum design curve of 2.08-2.35 μm narrowband filter

(3) MW1 窄带滤光片设计

探测器在波长大于 5.1 μm 之后不响应, 除通带外 5.1 μm 前其余光全部截止。膜层材料选择高折射率锗 (Ge) 和低折射率 ZnS, Ge 材料在 1.7 μm 前全部吸收。利用试验测得的低温折射率进行计算, 结果显示长波通膜系须由一个主膜系外加一个同结构的辅助截止膜系才能满足截止区要求, 当主膜系 $m=11$ 及辅助膜系 $m=9$ 时能够满足截止深度、陡度等指标要求。短波通膜系只需要一个主膜系即可满足截止区要求, $m=11$ 时可满足截止深度、陡度等指标要求。膜系结构最终设计为: 空气|0.66(0.5 HL0.5 H)⁹(0.5 HL0.5 H)¹¹|基片|(0.5 LH0.5 L)¹¹|空气, 长波通膜系 λ_0 为 2.75 μm , 短波通膜系 λ_0 为 4.75 μm 。采用 Essential Macleod 进行膜系结构局部优化后合成光谱透射率曲线, 如图 4 所示, 通带范围为 3.499~3.902 μm , 通带平均透射率为 90.1%, 带宽为 0.403 μm , 陡度为 2.4%, 截

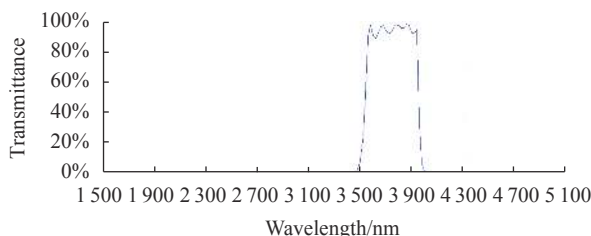


图 4 3.5~3.9 μm 窄带滤光片透射率光谱设计曲线

Fig.4 Transmission spectrum design curve of 3.5-3.9 μm narrowband filter

止深度为 0.2%, 波纹幅度为 0.1 T_p 。采用常温和低温折射率计算光谱, 结果显示: 低温通带位置向短波方向偏移, 偏移量为短波侧 58 nm, 长波侧 39 nm。

(4) MW2 窄带滤光片设计

探测器在波长大于 5.5 μm 之后不响应, 除通带外 5.5 μm 前其余光全部截止。膜层材料选择 Ge 和 ZnS。利用试验测得的低温折射率进行计算, 结果显示长波通膜系须由一个主膜系外加两个同结构的辅助截止膜系才能满足截止区要求, 当主膜系 $m=11$ 及辅助膜系 m 分别为 7 和 4 时能够满足截止深度、陡度等指标要求。短波通膜系只需一个主膜系即可满足截止区要求, $m=11$ 时可满足截止深度、陡度等指标要求。膜系最终设计为: 空气|0.51(0.5 HL0.5 H)⁴0.66(0.5 HL0.5 H)⁷(0.5 HL0.5 H)¹¹|基片|(0.5 LH0.5 L)¹¹|空气, 长波通膜系 λ_0 为 3.83 μm , 短波通膜系 λ_0 为 6.17 μm 。采用 Essential Macleod 进行膜系结构局部优化后, 合成光谱透射率曲线, 如图 5 所示, 通带范围为 4.84~5.06 μm , 通带平均透射率为 94.5%, 带宽为 0.22 μm , 陡度为 2.0%, 截止深度为 0.3%, 波纹幅度为 0.09 T_p 。采用常温和低温折射率计算光谱, 结果显示: 低温通带位置向短波方向偏移, 偏移量为短波侧 60 nm, 长波侧 40 nm。

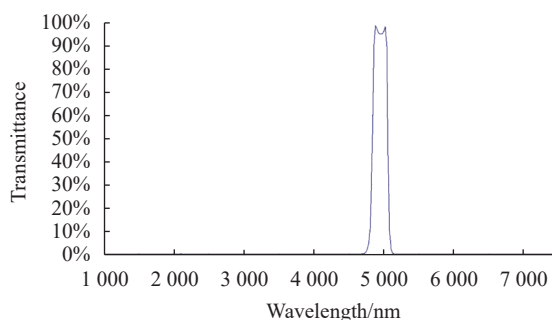


图 5 4.85~5.05 μm 窄带滤光片透射率光谱设计曲线

Fig.5 Transmission spectrum design curve of 4.85-5.05 μm narrowband filter

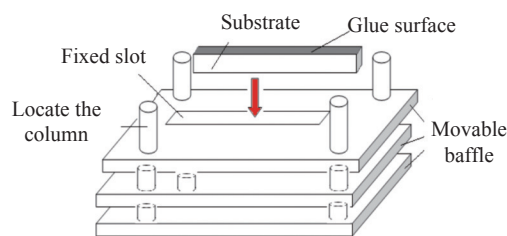
2 滤光片膜系镀制与拼接集成

窄带滤光片膜系镀制采用离子束辅助轰击的电子枪蒸发方法, 镀制设备采用 Denton 全自动光学镀膜设备。由于各膜系优化后均由规整膜系和非规整膜系组成, 因而膜厚监控采用光学监控和石英晶振监

控相结合的方法。上述设计膜系中共采用了 3 种材料, 每种材料采用的工艺参数如下, ZnS: 真空室温度为 150 °C, 本底真空度优于 5×10^{-3} Pa, 离子源通气量为 17 sccm, 沉积速率为 0.5 nm/s; Ge: 真空室温度为 160 °C, 本底真空度优于 5×10^{-3} Pa, 离子源通气量为 17 sccm, 沉积速率为 0.8 nm/s; YF₃: 真空室温度为 150 °C, 本底真空度为 5×10^{-3} Pa, 离子源通气量为 17 sccm, 沉积速率为 1.0 nm/s。

采用粘接胶将各窄带滤光片沿侧面进行拼接, 拼接过程主要包括涂胶、粘接及真空加热固化等步骤。影响拼接强度的因素主要有粘接胶性能、涂胶方法及粘接方法等。经过调研分析, 粘接胶采用满足空间环

境使用要求的双组份低温环氧树脂胶, 在真空条件下除气加热固化进行粘接。为了在保证粘接强度的同时减少溢胶污染并提高窄带滤光片共面度, 研制了专用涂胶和粘接工装, 如图 6 所示。涂胶工装采用狭缝定位涂胶方法, 精确控制涂胶量, 胶层分布均匀、胶量适中, 在不溢胶的情况下实现尽可能大的胶粘面积, 从而保证粘接强度。涂好胶的窄带滤光片在粘接工装上调整共面度、拼缝宽度和平行度以及长度方向的一致性, 达到要求后固定滤光片并置于真空炉中进行加热固化, 固化条件: 真空度约为 10 Pa, 温度为 70 °C, 时长为 2 h。固化后可制作出长线阵拼接集成滤光片。



(a) 涂胶工装示意图
(a) Schematic diagram of gluing tooling



(b) 粘接工装实物
(b) Photos of bonding tooling

图 6 涂胶和粘接工装

Fig.6 Gluing and bonding tools

为了确定窄带滤光片的最终厚度和拼缝宽度, 笔者取厚度 1.2 mm 的滤光片拼接后按相关标准进行抗振性试验, 分别制作了拼缝宽度为 30、20、10 及 5 μm 的试样, 试验后发现除拼缝 5 μm 的集成滤光片出现拼缝开裂外, 其余均完好, 未出现滤光片断裂及拼缝开裂情况。可以断定, 滤光片厚度选 1.2 mm、拼缝宽度选 10 μm 能够满足要求。

3 性能测试及空间环境模拟试验结果

采用 PE Optic frontier 低温红外光谱测试系统对窄带滤光片进行光谱测试, 将待测滤光片置于该系统低温杜瓦中进行温度调控, 最低可达液氮温度 (77 K)。笔者同时测试了常温和低温透射率光谱曲线, 4 个窄带滤光片透射率光谱测试曲线如图 7 所示, 偏向长波方向的是常温透射率曲线, 短波方向是低温透射率曲线。由此得到窄带滤光片光谱性能参数如表 2 所示, 结果显示低温条件下光谱性能参数基

本与设计值一致, 满足光谱性能要求。对比常温与低温测试结果, 窄带滤光片通带位置均向短波方向偏移, 偏移量分别为: SW1, 短波侧 19 nm, 长波侧 16 nm; SW2, 短波侧 21 nm, 长波侧 15 nm; MW1, 短波侧 56 nm, 长波侧 38 nm; MW2, 短波侧 64 nm, 长波侧 39 nm, 与设计结果吻合。利用万能工具显微镜测试了集成滤光片拼接性能, 结果如表 2 所示, 拼缝宽度为 10 μm, 拼缝不平行误差为 1 μm。拼接后的短中波红外长线阵拼接集成滤光片实物如图 8 所示。

为了验证集成滤光片的环境耐久性和空间环境适应性, 按照空间光学薄膜产品相关标准对集成滤光片的膜层附着性能、抗湿热性能、耐高低温冲击性能、抗辐照性能以及抗力学振动性能等进行了验证试验, 结果显示拼接集成滤光片表面膜层完好, 没有出现膜裂、起泡、脱膜等膜层附着性问题。试验前后各窄带滤光片的透射率光谱基本一致, 没有出现明显的光谱偏移和光谱形状变化。抗振性试验后未出现开

胶、断裂等影响使用的现象,集成滤光片的结构设计和拼接工艺能够满足卫星发射过程中的抗振性能要

求。目前,采用该论文技术研制的产品已经在空间成像光谱仪上得到了应用。

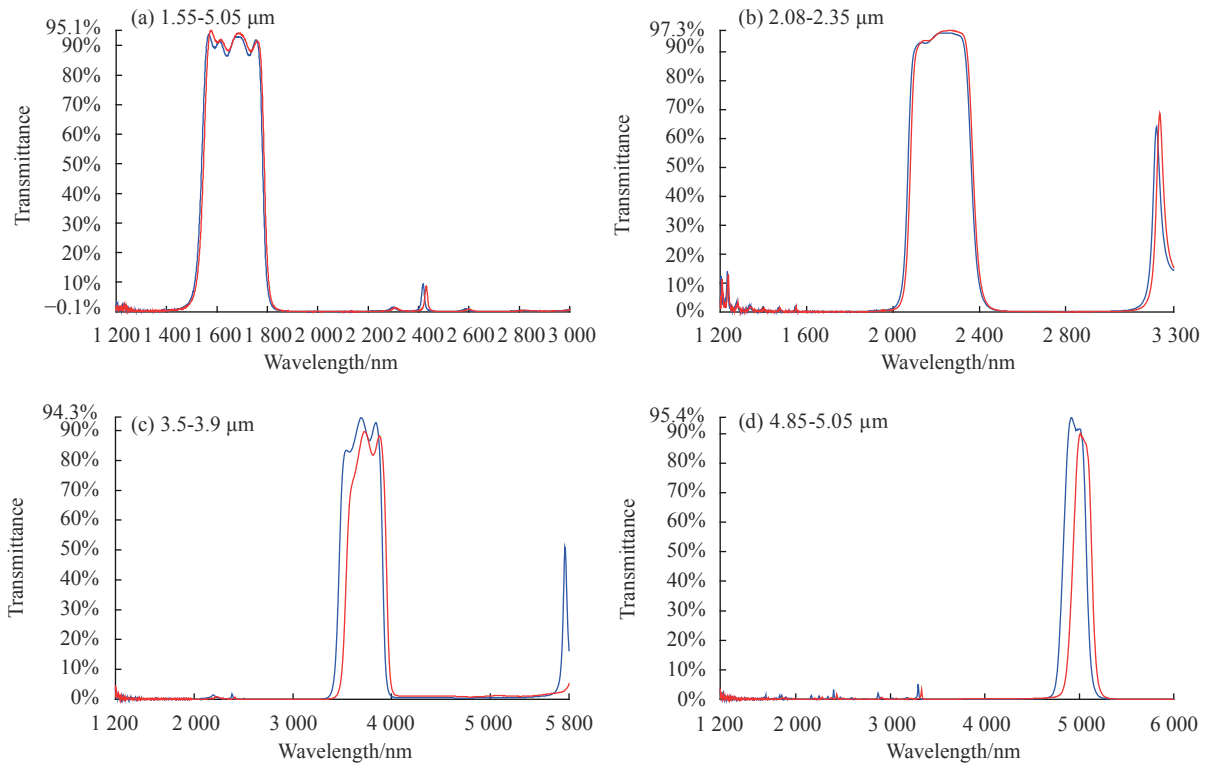


图 7 集成滤光片各窄带滤光片透射光谱测试曲线

Fig.7 Transmission spectrum test curves of narrowband filters

表 2 4 通道短中波红外长阵集成滤光片性能测试结果

Tab.2 Test results of 4-channel short/medim infrared LLASIF

	SW1	SW2	MW1	MW2
Bandpass	1.54-1.78 μm	2.07-2.36 μm	3.48-3.93 μm	4.82-5.05 μm
Bandwidth	0.24 μm	0.29 μm	0.45 μm	0.23 μm
Average transmittance	90.3%	94.0%	90.0%	90.5%
Rejectness	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%
Steepness	2.4%	2.2%	2.5%	2.3%
Coefficient of ripple	0.08 T_p	0.03 T_p	0.08 T_p	0.04 T_p
Minimum seam width	10 μm			
Seam parallelism error	1 μm			



图 8 4 通道短中波红外长阵拼接集成滤光片实物照片

Fig.8 Picture of 4-channel short/medim infrared LLASIF

4 结 论

针对空间成像光谱仪对于长阵拼接集成滤光片的需求,对短中波红外长阵拼接集成滤光片的设计、镀制及拼接等开展了研究。采用侧面拼接方式进行了各窄带滤光片的集成结构设计,并设计了各通道

窄带滤光片。采用离子束辅助轰击的电子枪蒸发方法镀制了窄带滤光片,结果显示:各窄带滤光片实测光谱性能与设计结果吻合,满足光谱性能要求。研制了专用涂胶工装和拼接工装,对拼接工艺开展了研究,涂胶、粘接及真空加热固化是拼接的关键,解决了粘接强度、溢胶、共面度、拼缝平行度等问题。最终研制出了 4 通道短中波红外长线阵拼接集成滤光片。环境耐久性和空间环境模拟试验结果表明:集成滤光片光谱性能及拼接性能均满足空间环境使用要求。研制的集成滤光片已经在我国空间多光谱成像仪上实现了应用。

参考文献:

- [1] Yue Tao, Huang Yumin, Liu Pinxiong, et al. Analysis of China's future satellite remote sensor development [J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, 17(4): 77-82. (in Chinese)
- [2] Li Huan, Zhou Feng. Developments of spaceborne hyperspectral imaging technique [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, 10(5): 38-43. (in Chinese)
- [3] Lu Yan. Application of infrared remote sensing in earth observation satellites(II) [J]. *Infrared*, 2014, 35(11): 5-9. (in Chinese)
- [4] Wang Duoshu, Li Detian, Fan Dong, et al. Development status of space spectral imaging and integrated optical thin film technology [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2019, 25(5): 285-294. (in Chinese)
- [5] Mei Suisheng, Wang Rongrui. Photoelectronic Technique[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [6] Huang Xiangcheng, Yang Yimin, Shi Jiantao, et al. The research of multispectral micro-array filters [J]. *Optical Instruments*, 1999, 21(4-5): 223-228. (in Chinese)
- [7] Laubier D, Gimenez T, Mercier-Ythier R. Development and performances of very long stripe-filters for a multispectral detector[C]//Earth Observing Systems VI. International Society for Optics and Photonics, 2002, 4483: 279-287.
- [8] Geoffray H, Loesel J, Loiret I, et al. Long quadrilinear CCD sensors equipped with long linear filters: characteristics and performances for the multispectral channel of Earth observing systems. Sensors[C]//International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [9] Wang Shaowei, Wang Li, Wu Yonggang, et al. Arrays of narrow bandpass filters fabricated by combinatorial etching technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 746. (in Chinese)
- [10] Chen Tao, Luo Chongtai, Liu Hongkai, et al. Development of multi-band linear variable filters [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(7): 72-75. (in Chinese)
- [11] Lin Bing, Liu Dingquan, Kong Lingfang, et al. Fabrication of mid-infrared 8-channel micro integrated filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9): 1316-1319. (in Chinese)
- [12] Li Detian, Wang Duoshu, Wang Jizhou, et al. Research on long stripe assembled filters [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2018, 24(6): 374-379. (in Chinese)
- [13] Wang Duoshu, Xiong Yuqing, Chen Tao, et al. Applications of optical thin film technology in China's aerospace industry [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(8): 710-716. (in Chinese)
- [14] Li Kaipeng, Wang Duoshu, Li Chen, et al. Study on optical thin film parameters measurement method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1048-1052. (in Chinese)
- [15] Wang Duoshu, Li Youlu, Li Kaipeng, et al. Research method of the temperature characteristic of infrared thin-films [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(4): 0404006. (in Chinese)