

# 中心波长 14.95 $\mu\text{m}$ 超窄带滤光片的研制

张 麟 倪 榕 黄 春 李 斌 刘定权

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要** 讨论了大气探测红外分光辐射计第 1 光谱通道超窄带滤光片的研制情况。采用富碲碲化铅材料作为高折射率膜层材料,通过控制沉积速率、沉积温度、真空度等工艺参数,镀制的膜层具有小的自由载流子浓度,整个膜系具有低的光吸收和高的透射能量。研制出入射光束半锥角  $\Phi$  为  $18^\circ$  时,中心波长 14.95  $\mu\text{m}$ 、带宽 0.065  $\mu\text{m}$ 、相对带宽小于 0.5% 的长波  $\text{CO}_2$  超窄带滤光片。该超窄带滤光片已实现空间应用 5 年,在天气预报数据获取中工作稳定。

**关键词** 薄膜;窄带滤光片;中心波长;碲化铅

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0731003

## Fabrication of a Narrow Bandpass Optical Filter with Central Wavelength at 14.95 $\mu\text{m}$

Zhang Lin Ni Rong Huang Chun Li Bin Liu Dingquan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** The design and fabrication of infrared ultra-narrow bandpass filters is presented, which have been employed in the channel No.1 in the infrared atmospheric sounder (IRAS). The filters are fabricated using Te-rich PbTe as the high-index coating material. By choosing suitable deposition rate and substrate temperature, the carrier concentration in the layers of PbTe can be controlled to a lower level in order to obtain the higher transmittance for the filters. The filters have a central wavelength at 14.95  $\mu\text{m}$  and a bandwidth of 0.065  $\mu\text{m}$ . The relative bandwidth is less than 0.5%. The filter has been used in space and worked stably for five years in the data acquisition of weather forecast.

**Key words** thin films; narrow bandpass filters; central wavelength; PbTe

**OCIS codes** 310.1860; 310.4165; 310.6845

## 1 引 言

伴随信息时代的到来,科学技术交流日益密切,新兴国家开始重视航天技术,导致全球航天遥感领域竞争激烈。星载大气垂直探测红外分光辐射计是用于探测全球对流层与平流层底部大气垂直温度分布的仪器,为气象预报和环境监测提供资料。美国 2002 年研制发射的 NOAA17 属于第 5 代极轨气象卫星,卫星上携带有高分辨力红外辐射探测器 (HIRS/3) 仪器,该仪器有 12 个长波通道 (5.7~15  $\mu\text{m}$ ),具备较高的空间分辨率。其观测通道非常具有代表性,在云层、水汽监测、大气廓线反演等方面有广泛的应用。该仪器中用来分辨各种气体含量

的红外窄带滤光片无疑是其关键部件,其中第 1 通道滤光片光学性能指标最高。得益于高性能的长波红外探测器件和红外光学薄膜器件的研制技术获得突破,我国从 20 世纪 80 年代初开始研制该仪器,2007 年首次发射,目前已有二台星载大气垂直探测红外分光辐射计在轨应用。对应 NOAA17-HIRS/3 仪器中第 1 通道的长波红外超窄带滤光片,所研制出主要性能指标为中心波长 14.95  $\mu\text{m}$ 、带宽 0.065  $\mu\text{m}$ 、相对带宽小于 0.5% 的长波红外超窄带滤光片。另外,为提高第 1 通道长波红外超窄带滤光片实际应用能力,本文着重从发射前地面环境、空间辐射及膜层性能随时间衰变等对其性能影响因素进行了长时

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-12-01

作者简介: 张 麟(1962—),男,正高级工程师,主要从事长波红外光学薄膜方面的研究。

E-mail: zhanglin@mail.sitp.ac.cn

间比较研究。同时,为提高该滤光片的信噪比,对通带外截止区域深度进行测量分析及评估。星载大气垂直探测红外分光辐射计在轨运行反馈数据表明,使用所研制的第1通道长波红外超窄带滤光片获得温度灵敏度为0.8 K(等效噪声温度差)与NOAA系列HIRS/3仪器中第1通道获得数据相当。

## 2 主要研究内容与结果

### 2.1 长波红外超窄带滤光片的设计

大气探测红外分光辐射计第1通道长波红外超窄带滤光片专用于检测大气中CO<sub>2</sub>气体的浓度。因此,滤光片的光学性能参照大气中CO<sub>2</sub>气体特征吸收峰(图1)来设计。

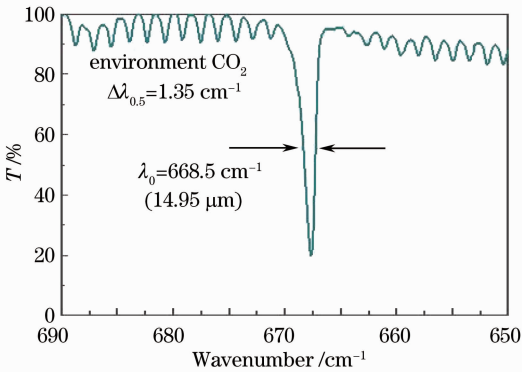


图1 大气中CO<sub>2</sub>气体特征吸收峰

Fig. 1 Characteristic absorption peak of CO<sub>2</sub> in atmosphere

根据图1中大气环境CO<sub>2</sub>气体吸收特征峰,美国NOAA系列HIRS大气红外分光辐射计中第1通道滤光片主要技术指标为:中心波长为14.95 μm,带宽为0.067 μm。为使我国星载大气垂直探测红外分光辐射计尽可能小型化,整机设计人员在探测器前面没有采用国外的消像差厚透镜方案,而是利用非成像技术设计的复合曲面反射聚光器,因此入射滤光片光束的半锥角达18°。

超窄带滤光片设计采用全介质法布里-珀罗滤光片设计原理。当入射光束是具有半锥角Φ的圆锥形时,滤光片的性能由遍及所有入射角对透射率曲线积分得出,滤光片带宽为

$$\omega_{\Phi}^2 = \omega_0^2 + (\Delta v')^2, \quad (1)$$

式中 $\omega_0$ 为光束垂直入射时的滤光片半宽度, $\Delta v'$ 为入射角由0°到Φ时中心波长的变化。 $\Delta v' = v_{\Phi} - v_0 = \frac{v_0}{\cos \Phi} - v_0 = v_0 \left( \frac{1}{\cos \Phi} - 1 \right)$ ,  $v_0$ 为光束垂直入射时滤光片的中心波长。

由上式可以看出:滤光片随入射角Φ增大,滤光片的透射率会恶化,中心波长向短波漂移,半宽度增加。因此,为了使具有半锥角Φ光束入射下的红外长波超窄带滤光片达到与光束平行入射时的光谱性能,滤光片的研制具有一定的困难性。

全介质法布里-珀罗滤光片峰值透射率与膜层吸收的平方成反比:

$$T_{\max} = \frac{1}{(1 + A_{1,2}/T_{1,2})^2}, \quad (2)$$

式中 $A_{1,2}$ 、 $T_{1,2}$ 分别表示法布里-珀罗反射膜1或2的吸收(包括散射)损耗和透射率。

现有通常的长波红外高折射率镀膜材料仅有Ge、PbTe,低折射率材料有ZnS、ZnSe。根据以往经验分析,高折射率材料Ge与低折射率材料ZnS组成膜系优点是膜层吸收系数小,透射率高,缺点是高低材料折射率比底,膜层层数多,允差小,同时薄膜沉积时二种材料蒸发温度高(Ge为1600℃,ZnS为1100℃),膜层沉积在基板上时迁移率较大,镀制高精度滤光片困难。采用高折射率材料PbTe,低折射率材料ZnSe组成膜系其优点是材料折射率比高,膜层层数少,允差大,二种材料蒸发温度低(PbTe为850℃,ZnSe为950℃),膜层监控和控制较容易,缺点是PbTe薄膜材料消光系数相对较大,滤光片透射率低。

2001年,Macleod<sup>[1]</sup>依据Pidgeon和Simith对红外长波超窄带滤光片的研究,给出了以高折射率材料PbTe,低折射率材料ZnS组成膜系的二种设计膜系,分别使用PbTe或ZnS作为组成膜系中的半波长,其设计出的滤光片带宽为3 cm<sup>-1</sup>。应用此设计,在入射滤光片的半锥角达18°时,从(1)式可以判断得出其无法满足我国星载大气垂直探测红外分光辐射计第1通道滤光片设计要求。为此,必须寻求一种能满足要求并镀制难度较小的膜系。

为满足第1通道滤光片技术指标要求,带通滤光片的半功率带宽小于3 cm<sup>-1</sup>。在目前仅有上述几种长波红外材料的情况下,只有靠增加带通反射堆层数和半波层级次方法。

通常含谐振腔的基本带通膜系的结构<sup>[2]</sup>有二种形式,一种是膜系谐振腔为高折射率膜层,另一种是膜系谐振腔为底折射率膜层。考虑长波红外材料性质和薄膜沉积工艺因素,采用以低折射率膜层材料为膜系的谐振腔层,两边对称分布的反射膜层。其光学厚度为设计波长的1/4带宽,估算式为

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_L^{2x-1} n_s}{m\pi n_H^{2x}} \frac{(n_H - n_L)}{(n_H - n_L - n_L/m)}, \quad (3)$$

式中  $n_H, n_L$  为膜系中高、低折射率材料层的折射率;  $n_s$  为基板折射率(Ge 基片);  $x$  为反射膜内高折射率膜层数;  $m$  为谐振腔干涉级次, 与间隔层厚度的关系为  $m = 2nd/\lambda_0$ 。

从带宽估算公式中可以看出, 要设计长波红外超窄带滤光片可以提高干涉级次  $m$ , 或增加  $x$  为反射膜内高折射率膜层数, 反射膜层数越多, 带宽越窄。

在清楚光束锥角入射滤光片引起的带宽增加和长波红外超窄带滤光片带宽的控制方法后, 借助于光学薄膜膜系辅助设计软件, 可以容易获得较为准确的设计膜系及曲线(图 2)。

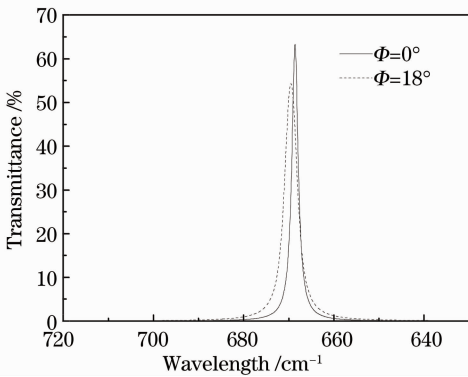


图 2 光束锥角入射与平行入射滤光片设计透射率比较  
Fig. 2 Comparison of calculated transmittance of filters irradiated by a parallel light and by a light with a beam angle

设计主峰膜系结构为:  $\text{Ge}|\text{LHLHLH2LHLHLH2L}|n_0$ 。由上述计算可以知道, 此膜系在光束平行入射时, 滤光片光谱带宽仅  $2.4 \text{ cm}^{-1}$ 。当入射光束半锥角  $\Phi$  为  $18^\circ$  时, 滤光片光谱带宽为  $3.18 \text{ cm}^{-1}$ , 中心波数峰值移动为  $1.5 \text{ cm}^{-1}$ , 设计带宽符合大气垂直探测红外分光辐射计对 1 通道滤光片要求。

## 2.2 长波红外超窄带滤光片的镀制

相对美国 NOAA 系列 HIRS 红外分光辐射计中第 1 通道滤光片主要技术指标, 所研制的对应滤光片技术性能要求更高。因此, 须要苛刻的工艺过程参数控制。如生产环境温湿度、基片温度、镀膜材料放置与蒸发速率等控制。另外, 优质的 PbTe 薄膜材料选择极其重要。由于在蒸发过程中 Pb 和  $\text{Te}_2$  的蒸汽分压强烈地依赖于蒸发材料的性质, 采用富碲碲化铅材料作为蒸发源材料<sup>[3]</sup>, 膜层的特性得到改善, 并具有相对宽裕的薄膜沉积温度范围。在薄膜生长过程中, 采用接触式测温的方法较好地控制了沉积过程中基片的温度。为此, 选用源转动、

样品盘静止恒温的 DM-700 型真空镀膜设备, 有效发挥了富碲碲化铅材料镀制膜层的优良性能。该滤光片中心波长定位精度要求为  $0.15\%$ , 选用红外光学薄膜膜厚自动监控系统, 反射式高级次监控方法, 有效地降低了监控误差, 提高镀制成品率。另外, 滤光片通带外的宽波段截止区域截止深度同样是一个重要指标。黄心耕等<sup>[4]</sup>等研制出高截止度宽带红外滤光片, 其宽波段截止深度小于  $0.1\%$ , 因此这里仅给出镀制结果。

## 2.3 测量、结果与分析

滤光片测量条件为室温, 放置样品室需纯氮气连续吹扫, 以防止  $\text{CO}_2$  气体特征峰干扰。使用美国 Perkin-Elmer 公司的 FTIR Spectrum GX 型傅里叶变换红外光谱仪测试样品, 仪器光谱分辨率  $0.5 \text{ cm}^{-1}$ , 光束接近平行入射, 光谱测试曲线如图 3 所示。

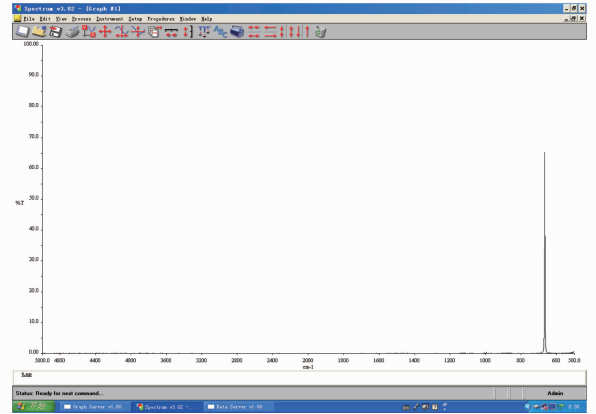


图 3 滤光片测试曲线

Fig. 3 Test curve for filters

由于第 1 通道滤光片定位精度为  $\pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$ , 为真实获得其在  $18^\circ$  会聚角的测试参数, 根据星载大气垂直探测红外分光辐射计的光路, 设计一个辅助测试装置, 放置在红外傅里叶变换光谱仪测试平台上。该装置通过透镜组合, 具有把平行光束模拟会聚成  $18^\circ$  角入射滤光片并还原成平行光束功能, 装置如图 4 所示。

应用此辅助会聚角测试装置, 可以较为准确的获得第 1 通道滤光片测试光谱曲线与参数, 测试曲线如图 5 所示。

由上述测量结果通过计算可以知道, 实际制作 1 通道超窄带滤光片在光束平行入射时, 滤光片光谱带宽仅  $2.3 \text{ cm}^{-1}$ 。当光束以半锥角  $\Phi$  为  $18^\circ$  入射时, 滤光片光谱带宽为  $2.9 \text{ cm}^{-1}$ , 中心波长峰值随光束锥角增大, 中心波数从  $667.9 \text{ cm}^{-1}$  短移至  $668.4 \text{ cm}^{-1}$  共短移  $1.5 \text{ cm}^{-1}$ 。因此, 所制作的滤光片带宽符合

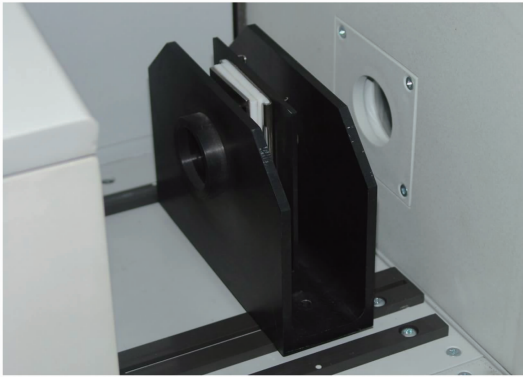


图 4 滤光片会聚角测试辅助装置

Fig. 4 Tools used for measuring the transmittance of filters irradiated by a light with a beam angle

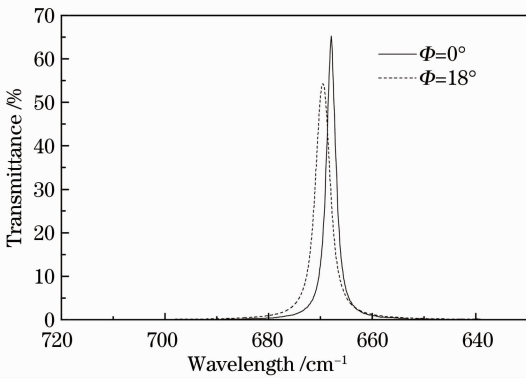


图 5 光束锥角入射与平行入射滤光片实测透射率比较  
Fig. 5 Comparison of measured transmittance of filters irradiated by a parallel light and by a light with a beam angle

大气垂直探测红外分光辐射计对 1 通道滤光片要求, 其与 NOAA17 对应通道光谱比较如图 6 所示。

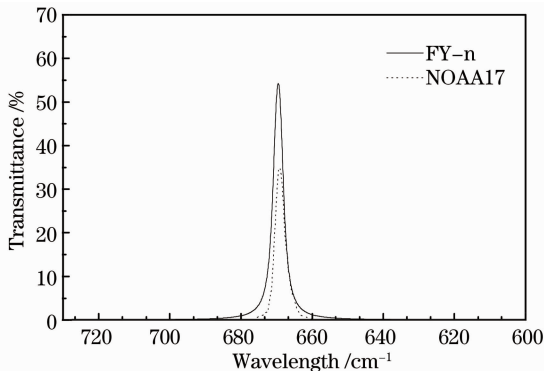


图 6 第 1 通道超窄带滤光片与 NOAA17 对应通道透射率比较

Fig. 6 Comparison of transmittance of our filter with that used in NOAA17

另外,长波红外光学薄膜通常由半导体材料作为高低折射率层,其光谱学性能的稳定性是一个重要的指标,它随时间、温度和空间辐照而产生变化。对此在研制过程中对数年前放置在暴露空气中的滤光片进行复测,并在中科院上海原子核所辐射技术中试研究基地模拟空间环境辐照剂量其  $D_{rate} T = 1.00\text{kGy/h}$  进行 30 h 辐照实验,样品实际吸收剂量为 30 kGy。环模实验结束后,滤光片表面没有异常,光谱复测结果表明,滤光片中心波长和带宽等参数变动微小,可以忽略。

### 3 结 论

通过理论分析和计算机辅助设计,设计出谐振腔为低折射率材料膜系,利用高折射率富碲碲化铅材料和低折射率硒化锌材料蒸发温度低,膜层吸收小,镀制工艺稳定等特点,研制出入射光束半锥角  $\Phi$  为  $18^\circ$  时,带宽为  $2.9\text{ cm}^{-1}$ ,中心波数  $668.4\text{ cm}^{-1}$  的长波红外超窄带滤光片,该滤光片经过 5 年在轨应用表明,其性能可靠,满足我国星载大气垂直探测红外分光辐射计对该滤光片的要求指标。

### 参 考 文 献

- 1 H A Macleod. Thin-Film Optical Filters (3rd Edition) [M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001, 288.
- 2 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006, 146.  
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006, 146.
- 3 Li Bin, Zhang Suying, Xie Ping, *et al.*. Crystal structure, surface morphology, depth profile of elements and mid-infrared optical constants of Te-rich lead telluride films [J]. J Infrared Millim Waves, 2005, 24(1): 23-26.  
李 斌, 张素英, 谢 平, 等. 富碲碲化铅薄膜的晶体结构、表面形貌、元素深度分布和中红外光学常数[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(1): 23-26.
- 4 Huang Xingeng. Development of wide-passband infrared filter with high rejection rate for infrared earth sensor [J]. Optical Instruments, 2001, 23(5-6): 169-173.  
黄心耕. 红外地球敏感器用高截止度宽带红外滤光片研制[J]. 光学仪器, 2001, 23(5-6): 169-173.

栏目编辑: 韩 峰