第 23 卷 第 5-6 期
2001 年 12 月

光 学 仪 器
OPTICAL INSTRUMENTS

Vol. 23, No. 5-6
December, 2001

文章编号:1005－5630(2001)5/6－0169－05

红外地球敏感器用高截止度宽带红外滤光片研制*

黄心耕
(中国空间技术研究院北京控制工程研究所,北京 100080)

摘要:高截止度宽带红外滤光片是新型红外地球敏感器的关键件之一。介绍了高截止度宽带红外滤光片的设计方法和镀膜的工艺技术,给出了膜系设计和研制的结果,并与国内外同类滤光片的光学特性进行了比较,试验表明这种红外滤光片的膜系设计是成功的。

关键词:红外地球敏感器;截止度;膜系;红外滤光片;光学特性
中图分类号:O484.4　　文献标识码:A

Development of wide-passband infrared filter with high rejection rate for infrared earth sensor

HUANG Xing-geng
(Chinese Academy of Space Technology, Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China)

Abstract: Wide-passband infrared filter with high rejection rate is one of the key elements in New infrared earth sensor. In this paper, the design method and Coating process of wide-passband infrared filter with high rejection rate are described. The result of film system design and development are given. Optical characteristics of similar infrared filters at home and abroad are compared. Experiment results show that the film system design is successful.

Key words: infrared earth sensor; rejection rate; film system; infrared filter; optical characteristics

1 引 言

应用于三轴稳定卫星的高截止度 14μm～16.25μm 宽带红外滤外片是高精度新型红外地球敏感器的关键件之一,它安装在卫星上通过光学系统获取地球的红外辐射信息,使红外地球敏感器得到比较稳定的地平信号,以确定卫星在空间的姿态。由于高截止度宽带红外滤光片能极大地抑制背景辐射、有效地提高信噪比,所以没有这种高截止度的红外滤光片,红外地球敏感器就不可能提高姿态的测量精度。

自 60 年代以来,各国先后在红外地球敏感器中采用过各种不同带宽的红外滤光片,其中有 1.8μm～20μm、8μm～14μm、8μm～22μm、13.5μm～22μm、14μm 前截止和 14μm～16μm 等。科学实验的结果表明:为了消除冷云的干扰,防止太阳热梯度造成的测量误差,尽可能多地将太阳光滤掉,唯一有效的办法就是在红外地球敏感器中加上带宽为 14μm～16μm 的红外带通滤光片。目前世界各国在卫星上都采用这种红外带通滤光片,尤其是采用高截止度的 14μm～16.25μm 宽带红外滤光片。

2 技术要求

为了进一步提高红外地球敏感器的姿态测量精度,对滤光片的性能要求愈来愈高,一般的 14μm～

* 收稿日期:2001-08-30
作者简介:黄心耕(1942-),男,浙江温岭人,高级工程师,长期从事红外技术和卫星光学敏感器方面的研究。

16μm 红外带通滤光片是无法满足要求的，只有高截止度的 14μm～16.25μm 宽带红外滤光片才能满足要求（见表 1），使带宽更宽，达到 2.25±0.2μm，中心波长的定位精度更高，达到 15.225±0.1μm，使地球敏感器获得更大的能量。

表 1 红外地球敏感器用高截止度型和一般型红外滤光片技术要求

项目 \ 类型	高截止度型	一般型	
		OCLI 公司	502—A
峰道透射率 T_p(%)	≥70	≥65	
平均透射率 T_m(%)	≥60	≥55	≥60
起始波长 λ_1(μm)	$14_0{}^{+0.2}$	14.23±0.14	
截止波长 λ_2(μm)	$16.25_0{}^{+0.2}$	16.08±0.16	
中心波长 λ_0(μm)	(15.225±0.1)	(15.155±0.15)	15.125±0.2
带宽 $\Delta\lambda$(μm)	(2.25±0.2)	(1.85±0.3)	1.8±0.2
$1/10T_p$ 带宽 $\Delta\lambda_{0.1}$(μm)	2.7±0.2	$\lambda_1-(0.1\sim0.3)$ $\lambda_2-(0.08\sim0.31)$	
$1/100T_p$ 带宽 $\Delta\lambda_{0.01}$(μm)	3.15±0.2		
<12μm 次峰 T_1(%)	$\leqslant 10^{-4}T_p$	<0.1	<1
17μm～22μm 次峰 T_2(%)	$\leqslant 10^{-3}T_p$	<0.1	<1

3 设计方法

由于高截止度宽带红外滤光片的带宽超过 2.05μm，所以不能采用光学厚度为四分之一波长的两种材料（高折射率材料 H 和低折射率材料 L），按中心对称交替叠成介质膜系 $(HLHLH)^S$ 来设计。这种由中心对称的 λ/4 堆组成的红外滤光片，带宽主要由镀膜材料的折射率决定，由于镀膜工艺的影响和膜料性能的不一致引起折射率的变化，虽然膜系设计比较简单，在研制中工艺也相对容易，但在中心波长 $\lambda_0=15\mu m$ 处其带宽与高截止度宽带红外滤光片的带宽相差 0.45μm 以上，所以不能采用。

为此，我们采用长波通膜系和短波通膜系的组合来构成高截止度 14μm～16.25μm 的宽带红外滤光片。这种滤光片只要改变其中一组膜系的中心波长 λ_0，带宽就可以随这改变，满足技术要求。

根据表 1 的高截止度型红外滤光片的主要技术要求，可选择适合 14μm～16.25μm 使用且光学性能稳定的高、低折射率材料及基片材料。在设计中，根据膜系的带宽是否符合要求，等效折射率是否匹配，对二种基本膜系 $(H/2\ L\ H/2)^S$ 和 $(L/2\ H\ L/2)^S$ 进行分析计算。这种由三层对称膜系组成的长波通加短波通红外滤光片，主要考虑通带中的等效折射率匹配问题，通过设计波长变量 λ_0/λ，并从膜系等效折射率曲线（图略）查得该膜系在通带中的等效折射率变化。对 (H/2 L H/2) 膜系，二组膜层材料 Ge/ZnS 和 PbTe/ZnS 在通带中的等效折射率 E 与基片明显不匹配，所以 (H/2 L H/2) 膜系不能满足高截止度宽带红外滤光片的技术要求。对 (L/2 H L/2) 膜系，三组膜层材料 Ge/ZnS、PbTe/ZnS 和 PbTe/ZnSe 在通带 14μm～16.25μm 的等效折射率如表 2 所示，分析认为该膜系在不同的中心波长下，其等效折射率能分别与锗基片及入射介质匹配，满足高截止度宽带红外滤光片的技术要求。

表 2 $(L/2\ HL/2)^S$ 膜系的等效折射率 E

膜料 \ 膜系	消 1	消 2	消 3	前截止	后截止
Ge/ZnS	3.4	3.2	3.1	5.3	0.9
PbTe/ZnS	3.95	3.66	3.58	7.0	0.8
PbTe/ZnSe	4.25	3.9	3.8	7.5	1.0

由于透射率 T 是滤光片的主要技术指标之一，对红外地球敏感器尤为重要。它不仅取决于膜系与基片的折射率匹配情况，也取决于膜系与入射介质的折射率匹配情况。若膜系的等效折射率与它们匹配，则

反射损失小，透射率高；若等效折射率与它们不匹配，则反射损失大，透射率低。通过分析，排除了$(H/2\ L\ H/2)^S$膜系，选择$(L/2\ H\ L/2)^S$膜系来设计 14μm～16.25μm 的高截止度宽带红外滤光片是比较理想的。

4　高截止度宽带红外滤光片的膜系设计

根据方案分析结果，我们选用三层对称膜系$(L/2\ H\ L/2)^S$及其组合来设计 14μm～16.25μm 的高截止度宽带红外滤光片，通带由长波通和短波通膜系组成，然后进行消次峰。消次峰膜系由$(L/2\ H\ L/2)^S$膜系的叠加组成，达到抑制通带以外的次峰，使滤光片的性能满足技术要求。

众所周知，三层对称膜系(PQP)的特征矩阵为：

$$M_{pqp}=\begin{bmatrix}\cos\delta_p & i/n_P\sin\delta_p\\ in_p\sin\delta_p & \cos\delta_p\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\delta_q & i/n_q\sin\delta_q\\ in_q\sin\delta_q & \cos\delta_q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\delta_p & i/n_p\sin\delta_p\\ in_p\sin\delta_p & \cos\delta_p\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}M_{11} & M_{12}\\ M_{21} & M_{22}\end{bmatrix}$$

当 $M=-1$ 时，截止带的边界可由下式得到：

$$\lambda_O/\lambda_C=1\pm 2/\Pi\sin^{-1}[(n_H-n_L)/(n_H-n_L)]$$

式中　λ_C 为截止波长

λ_O 为截止带中心波长

从表 3 的计算结果可知，用三组不同中心波长的消次峰膜系的叠加来扩展截止带宽度是行之有效的。

表 3　　不同膜料的截止带宽度

膜系 / 膜料	消 1＋消 2＋消 3	前截止	后截止
Ge/ZnS	9.9μm～3.96μm	13.8μm～9.43μm	16.25μm～24.65μm
PbTe/ZnS	8.3μm～2.13μm	13.8μm～7.73μm	16.25μm～29.01μm
PbTe/ZnSe	8.7μm～2.73μm	13.8μm～8.32μm	16.25μm～26.77μm

根据通带外次峰分别为$\leqslant 10^{-4}T_p$和$10^{-3}T_p$的要求，通过计算截止带中心波长处的透射率和截止波长处的透射率，选择膜系的周期数 $S=7$ 能满足要求。

由于膜系的等效折射率匹配好坏将严重影响滤光片的性能，所以在膜系设计中必须使等效折射率相互匹配，以减少不匹配所引起的反射损失，得到较高的透射率。对于$(L/2\ H\ L/2)^S$膜系，既要考虑组成通带的长波通膜系和短波通膜系在通带中的等效折射率，也要考虑三组消次峰膜系各自在通带中的等效折射率及其相互间的匹配问题。

从表 2 的结果和膜系的结构分析，在消次峰膜系的一侧，膜系之间、膜系与锗基片之间的等效折射率是基本匹配的，反射损失较小，但消次峰膜系与入射介质之间是不匹配的，必须设计一匹配层，以有效地减小反射损失；在另一侧，后截止膜系与锗基片的等效折射率严重不匹配，以$(L/2\ H\ L/2)$膜系的三种材料组合为例，反射损失分别高达 43.98%、52.44%和 36%，所以必须在后截止膜系与锗基片之间设计另一匹配层，使反射损失分别降到 3.92%、9.49%和 0.9%，满足透射率的要求。另外，在设计中必须考虑锗(Ge)基片和高折射率材料碲化铅(PbTe)的吸收率对滤光片光学性能的影响，计算数据表明，在波长为 $14_0{}^{+0.2}$～$16.25_0{}^{+0.2}$中，波长长，吸收大，透射率就降低；为减小吸收，则应将滤光片的起始波长 λ_1 和截止波长 λ_2 设计在公差值的下限，达到提高透射率的目的。

综合上述设计和分析，从技术要求和工艺的可行性出发，考虑尽量减少滤光片的膜层层数，特选择高折射率材料为 PbTe，低折射率材料为 ZnSe 的$(L/2\ H\ L/2)^S$膜系结构，并设计合理的匹配层 L_1，得到带宽为 14μm～16.25μm 的高截止度宽带红外滤光片的膜系为(参考中心波长为 10.5μm)：

$$E(L/2\ H\ L/2)^7 1.45L_1|Ge|A(L/2\ H\ L/2)^2(L/2\ H\ L/2)^5B(L/2\ H\ L/2)^7$$
$$C(L/2HL/2)^7D(L/2HL/2)^7 1.45L_1$$

式中　A 为修正系数

B、C、D、E 为系数

5 高截止度宽带红外滤光片的镀制

滤光片是在高真空光学镀膜机中镀制的。由于此滤光片膜层多达 107 层，中心波长又长，每层膜的光学厚度只能用短波长控制，在镀制前对系统进行快速升温、分段降温和恒温控制，采用自行研制的有 15/20 个监控片的换片机构和高性能的“会聚光”红外光控系统，利用反射光极值法监控。为提高膜层的监控精度，必须合理选择并交替使用不同的监控波长和正确使用监控片来监控，在 175 ℃的高温中，按照设计的膜系镀制在锗基片上，并通过调整膜系中心波长研制成功高截止度宽带红外滤光片（见图 1）。

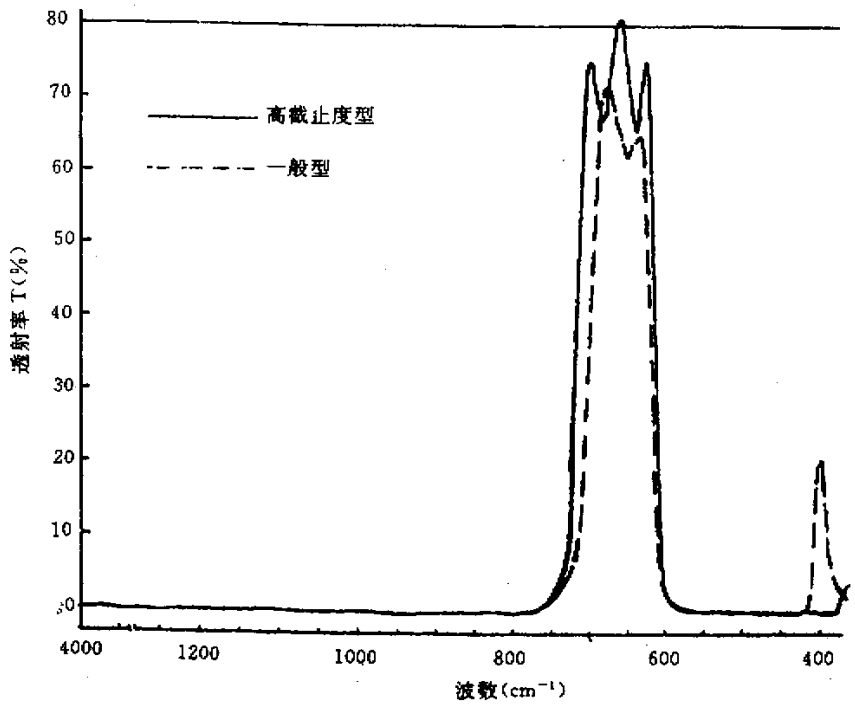

图 1 地球敏感器用红外滤光片透射曲线

6 性能比较及讨论

我们设计和研制的两种类型的红外滤光片样品，均经意大利伽利略（Galileo）公司测试，其透射曲线与我们用 PE-580B 红外分光光度计测试的结果基本一致，特别是高截止度宽带红外滤光片，主要性能指标达到伽利略公司的技术要求，与伽利略公司在新型红外地球敏感器中使用的 14μm～16.25μm 高截止度红外滤光片典型特性相当，T_p 和 T_m 都超过表 1 的要求（见表 4）。

从表 4 两种类型的红外滤光片性能比较说明，高截止度宽带红外滤光片的性能明显优于一般型红外滤光片，这种新型红外滤光片与目前各国在地球敏感器中广泛应用的一般型红外滤光片相比，有通带更宽、截止带次峰透射率更低和长波截止带更宽的优点，使地球敏感器能获得更大的二氧化碳（CO_2）红外辐射能量，能十分有效地提高信噪比和探测精度。

我们研制的高截止度宽带红外滤光片，按美国军用标准 MIL-F-48616“红外干涉滤光片一般规范”和意大利伽利略公司“14μm～16.25μm 红外滤光片采购规范”要求，进行了振动试验、温度循环试验、摩擦试验和耐久性选定试验之一的浸水试验，膜层质量完全符合要求；也完全符合航天部标准 QJ1697-89“红外干涉滤光片通用技术条件”浸水 72 小时和热真空试验的要求；在室内自然条件下放置达 5 年之久，其光学性能基本不变，充分说明这种高截止度宽带红外滤光片设计合理、工艺可靠。与伽利略公司在新型红外地

球敏感器中使用的 14μm～16.25μm 高截止度典型红外滤光片相比，长波截止带宽、次峰透射率更低，更有利于抑制背景辐射。笔者认为，尽管高截止度宽带红外滤光片比一般型红外滤光片的膜层多 51 层，研制难度很大，但只要调整好膜系的中心波长和监控波长，精确控制膜层厚度，就能研制出性能更加优异的高截止度宽带红外滤光片，满足三轴稳定卫星用高精度红外地球敏感器的需要。

表 4　　地球敏感器用红外滤光片性能比较

项目 \ 类型	北京控制工程研究所		意大利伽利略公司
	高截止度型	一般型	高截止度型
峰值透射率 T_p(%)	77～83	72～79	81
平均透射率 T_m(%)	68～75	65～73	78
带宽 $\Delta\lambda$(μm)	2.051～2.45	1.7～1.82	2.282
$1/10T_p$ 带宽 $\Delta\lambda_{0.1}$(μm)	1.657～2.95	2.39～2.475	2.496
$1/100T_p$ 带宽 $\Delta\lambda_{0.01}$(μm)	3.30～3.38	3.25～3.39	2.739
短波次峰 T_1(%)	≤0.025 (<1500cm^{-1})	≤0.2 (<1600cm^{-1})	≤0.02 (<855cm^{-1})
	0.25 (1400cm^{-1})	0.6 (1550cm^{-1})	0.04 (850cm^{-1})
长波次峰 T_2(%)	≈0 (375cm^{-1})	≈20 (400cm^{-1})	≈8.1 (466cm^{-1})
长波截止带(μm)	17～26.67	17～24.09	17～21.01

7　参考文献

[1] 唐晋发、顾培夫．薄膜光学与技术[M]．北京：机械工业出版社，1989.

[2] 黄心耕，卢小实，高修涛．地球敏感器红外带通滤光片膜系设计及其研制[J]．航天控制，1996，14(3)30～39.

[3] 黄心耕．地球敏感器光谱波段对红外带通滤光片的影响[J]．中国空间科学技术，2000，20(4)：60～66.