

文章编号: 0253-2239(2010)04-1197-04

# 锗窗口红外宽光谱增透膜的研制

于天燕 成效春 秦 杨 刘定权 张凤山

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要** 红外宽光谱增透膜作为红外光学系统中的关键元件,其研究是一项比较复杂而备受重视的工作。针对风云二号辐射计锗窗口的宽光谱增透膜的要求,通过对镀膜材料在既定工艺条件下的光学参数的准确拟合,采用非对称等效层理论,并将材料光学参数拟合值代入到膜系的优化过程中,从而得到能够与实际情况接近的理论设计膜系。经过工艺优化后,研制出的宽光谱增透膜在要求的  $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ ,  $6.3\sim 7.6\ \mu\text{m}$ ,  $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$  三个通道的平均透射率均大于 96%,而  $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$  通道的平均透射率大于 94%。膜层能够经受住浸泡、高温高湿等一系列环模试验的检验,完全满足项目的使用要求。

**关键词** 薄膜;红外光学薄膜;宽光谱增透膜;非对称等效层;光学参数

中图分类号 TM223 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1197

## Design and Manufacture of Broadband Infrared Antireflection Coatings for Germanium Windows

Yu Tianyan Cheng Xiaochun Qin Yang Liu Dingquan Zhang Fengshan

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

**Abstract** As the key components of the IR optical systems, infrared (IR) antireflection (AR) coatings are such important topic and the study of them are so complex. According to the demands of germanium(Ge)windows for the researching project, non-symmetrical equivalent layers theory are adopted to design the multilayer broadband AR coatings. The optical coefficients of the coating materials are fitted at established technics conditions and all the fitted optical coefficients are used in the layer thickness optimization process. A theoretical design approaching to the factual situation is obtained. After the optimization of the deposition technics, high performance broadband AR coatings are finished. The average transmittance of the spectrum tunnels such as  $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$ ,  $6.3\sim 7.6\ \mu\text{m}$ ,  $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$  is more than 96% and the average transmittance of the tunnel  $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$  is more than 94%. All the AR coatings can experience the environment tests and meet the optical system's request.

**Key words** thin films; infrared optical coatings; broadband antireflection coatings; non-symmetrical equivalent layers; optical coefficients

### 1 引 言

在 2006 年发射的风云二号静止气象卫星的遥感载荷——多通道扫描辐射计中有可见、中波、水汽和长波等 5 个光谱通道,成功地提供了地球目标白天可见光图像,昼夜红外图像和水汽分布图<sup>[1]</sup>。正是在这颗成功运转的卫星中首次增设了  $3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$  的中波探测通道,开创了国际同类卫星的先河。加上长波红外  $10.3\sim 11.3\ \mu\text{m}$ ,  $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$  的两个探测通道以及水汽  $6.3\sim 7.6\ \mu\text{m}$  通道,也对窗

口器件增透膜提出了  $3.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$  的宽光谱增透要求。而随着卫星载荷性能的不断改进,对于相应的薄膜器件,光谱要求也越来越高。

航天光学系统首先关注的是高的光学效率,因此要求所有光学器件包括窗口、透镜及各类分色片等要尽可能地减少反射损耗和消除“鬼像”。除此之外,空间用光学薄膜器件还要求具有良好的牢固度、致密度、耐热、冷冲击性以及抗潮解性等。因此除了要满足需要的光谱特性外,还对膜层材料的选择、膜

收稿日期: 2009-04-09; 收到修改稿日期: 2009-06-05

作者简介: 于天燕(1973—),女,副研究员,主要从事红外光学薄膜方面的研究。E-mail: tyan\_yu@mail. sitp. ac. cn

系结构设计以及工艺选择都有特殊的考虑<sup>[2]</sup>。既要具有高的光谱特性,又要具有良好的空间可靠性,这对宽光谱长波红外薄膜器件的研制来说,无论是设计还是工艺都具有很大的难度。

## 2 锗基底及镀膜材料的光学特性

在空间红外遥感系统中,锗(Ge)晶体由于其红外透光区域宽而经常被用作各种光学元件。在风云二号扫描辐射计中,所有杜瓦窗口及中继透镜的基底都采用 Ge,其光谱透射曲线如图 1 所示。从图中可以看出 Ge 晶体具有比较宽的红外透射区,但是在 11  $\mu\text{m}$  后有很明显的吸收。图 2 为 Ge 基底材料的  $n, k$  值拟合曲线。

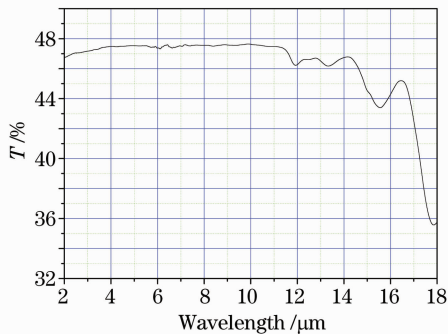


图 1 Ge 基底的透射光谱

Fig. 1 Transmission curve of substrate Ge

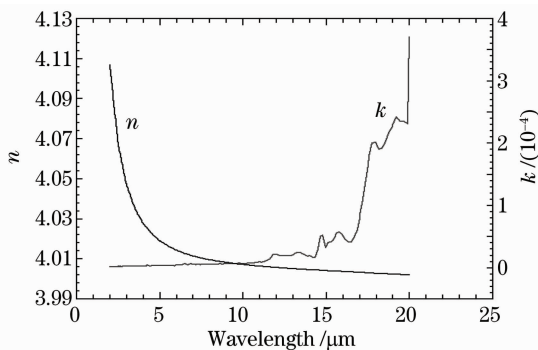


图 2 Ge 基底的  $n, k$  值

Fig. 2 Coefficients curve of Ge

在镀膜材料的选取上,低折射率材料的选择受到了一定限制,因为具有比较宽的红外透光区的材料本身就很少,主要以稀钽氟化物为主。本文窗口的研制选用  $\text{YbF}_3$  作为低折射率材料。众所周知,稀钽氟化物在长波端存在较大的吸收,且大都存在比较严重的应力,因此,提高长波端透射率与减小应力影响,提高产品可靠性,就成为必须首先解决的矛盾。这就要求在膜系设计中给予充分的考虑。图 3 为  $\text{YbF}_3$  的光学常数拟合曲线。从拟合结果可以看

出,  $\text{YbF}_3$  在 11  $\mu\text{m}$  以后吸收明显增大,因此,对于 3.5~12.5  $\mu\text{m}$  的宽光谱增透,要提高其长波端两通道的透射率,通过合理的膜系设计和工艺控制减小镀膜材料的吸收影响,将会起到明显的作用。

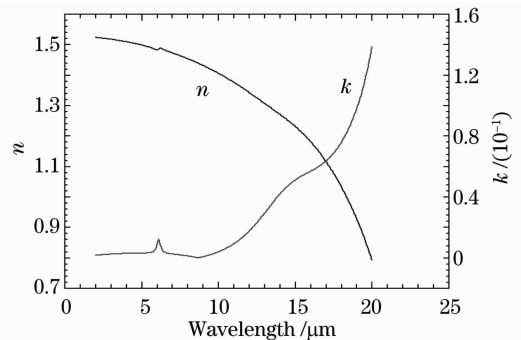


图 3  $\text{YbF}_3$  的  $n, k$  拟合值

Fig. 3 Fitted coefficients curve of  $\text{YbF}_3$

## 3 膜系设计

宽光谱增透膜的理论设计方法很多,也有很多的实际应用<sup>[3~6]</sup>。J. A. Dobrowolski<sup>[7]</sup>详尽归纳了增透膜——作为一个关键的光学元件,其发展过程、所涉及到的类型及设计方法。对于红外尤其是长波红外宽光谱增透膜,由于所用基底及镀膜材料在波长大于 11  $\mu\text{m}$  的区域大都存在比较严重的吸收,因此其膜系设计相对比较复杂。

根据前面的材料选择,为了达到与基底的折射率匹配,最大限度地实现高透射率,减少膜层数,在膜系设计中采用了非对称等效层理论<sup>[8,9]</sup>,在初始设计中靠近基底一侧选用了 MHM 这样的结构。为了研制出能够在尽可能宽的光谱范围内工作的高效宽光谱增透膜(BBAR),根据以往经验总结出一套基于计算机辅助的膜系设计方法。

在 BBAR 的设计中除了材料选择外,层数是另外一个关键的因素。薄膜设计需要有足够的层数来完成要求的光谱特性。然而,太多层数将会增加膜系设计对于膜厚误差的灵敏度,同时过多的膜层界面可能引入散射影响。因此在这套方法中,初始膜系能够根据优化结果及目标光谱特性要求来增减层数。使用 FilmWizard 膜系设计软件,透射率及其在目标函数中的允差值、基底的折射率、拟合后的镀膜材料的折射率都输入到程序中<sup>[10]</sup>。初始膜系中除了前面讲的非对称等效层外,后面的膜系采用了一个近似于由高低折射率  $n_H, n_L$  材料组成的线性渐变折射率膜系。线性渐变折射率减反射膜可表示为

$$n(x) = n_L + (n_H - n_L)x/t, \quad (1)$$

式中  $n(x)$  为从膜层外表面到给定距离  $x$  处的折射率,  $t$  是膜层的物理厚度。

初始设计的膜层厚度选为与目标函数所定义的中心波长的厚度一样。膜层数基于其他 BBAR 的研究经验选为 15 层。使用黄金分割优化程序, 改变膜层厚度  $d$  直到最大程度地接近目标函数。选择这一特殊的优化程序是因为它能够迅速地达到

$$M = \left[ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left( \frac{B_i^T - B_i}{W_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

给出的均方根评价函数  $M$  最小值<sup>[3]</sup>。式中  $B_i^T, B_i$  及  $W_i$  分别是  $m$  个目标透射率点中第  $m$  层的目标值、初始值及允差。

黄金分割法假设在  $d_{\min}$  至  $d_{\max}$  的厚度范围内评价函数至多一个最小值。这些初始的最大和最小厚度允许值是通过薄膜沉积过程限定的。利用初始膜系中第一层的厚度值  $d_{\min}, d_{\max}, d_1$  及  $d_2$ , 这一方法初步估算出评价函数  $M_{\min}, M_{\max}, M_1, M_2$ 。  $d_1, d_2$  表示为

$$d_1 = d_{\min} + 0.382(d_{\max} - d_{\min}), \quad (3)$$

$$d_2 = d_{\min} + 0.618(d_{\max} - d_{\min}). \quad (4)$$

对各层厚度  $d$  循环进行优化, 同时根据优化结果及工艺可实现程度, 对膜层数进行增减调整。重新优化, 直到满足目标函数及光谱性能。这样就得到了最终膜系设计结果。

在膜系优化过程中, Ge 及 YbF<sub>3</sub> 的光学参数均采用了拟合值, ZnS 由于其在所涉及的波段吸收较小而未做考虑。这样在优化过程中基底及镀膜材料的吸收及色散影响就已经计算在内, 因此理论设计与实际更接近。

针对研制的宽光谱增透膜, 初始膜系为

Air | MLMLMLMLMLMHMHM |

Ge | MHMHMLMLMLMLMLM | Air

其中 M 为 ZnS, H 为 Ge, L 为 YbF<sub>3</sub>。按照前述设计思想对各膜层厚度进行优化直到优化结果满足给定目标值要求。最终优化结果为

Air | 0.25M2.6L1.5M0.687L1.187M0.693H1.34M1.32H0.559M | Ge | 0.559M1.32H1.34M0.693H1.187M0.687L1.5M2.6L0.25M | Air

图 4 中曲线  $a$  为该结果的理论曲线,  $b$  为该膜系在不考虑吸收时的理论曲线 ( $T$  为透射率)。

从图 4 中可以看到 11  $\mu\text{m}$  以后, 吸收对透射率有明显的影响。因此, 准确拟合薄膜材料的光学常数, 对于设计与实际情况相符的、具有较大吸收的长波红外光学薄膜器件具有重要的意义。

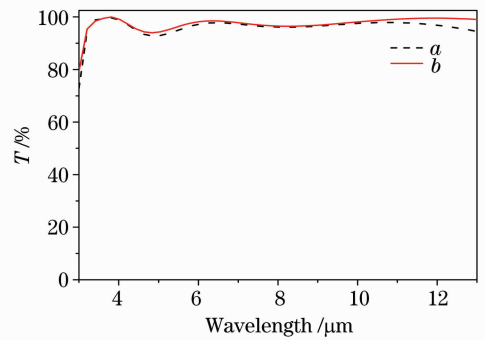


图 4 优化膜系的理论曲线

Fig. 4 Theoretical curve of the optimized multilayer coating

## 4 宽光谱增透膜的制备及测试

### 4.1 制备工艺

长波红外宽光谱增透膜的研制是在国产箱式真空镀膜设备上进行的。三种镀膜材料的膜层均采用电阻加热蒸发的方式沉积的, 膜层厚度采用变极值法进行光学监控。

基片在镀制之前进行烘烤保温 2.5 h。镀膜前用高能离子源进行离子轰击清洗, 以提高薄膜与基片的附着力。烘烤温度的确定是在对 ZnS, YbF<sub>3</sub> 等做过大量材料试验的基础上筛选出的, 对各材料光学常数影响最小同时可靠性最好的一个温度点。

对于长波红外光学材料, 沉积速率的快慢除了对可靠性产生影响外, 对于吸收也产生一定影响。因此, 为了尽可能减少材料吸收尤其是 YbF<sub>3</sub> 的吸收对长波端透射率的影响, 分别对所用三种材料的沉积速率对吸收的影响进行了一系列试验, 最终确定出适合于三种材料的各自的沉积速率。对于存在较大应力的 YbF<sub>3</sub> 膜层也采取了相应的措施及工艺<sup>[11-12]</sup>, 尽量减少应力的集中。基于这些工艺, 镀制出光学性能及可靠性皆好的红外宽光谱增透膜。

### 4.2 光谱特性及可靠性测试

图 5 为所研制增透膜的实测透射率光谱曲线。与理论设计曲线基本相符, 在要求的 3.5~4.0  $\mu\text{m}$ , 6.3~7.6  $\mu\text{m}$ , 10.3~11.3  $\mu\text{m}$ , 11.5~12.5  $\mu\text{m}$  四个通道中, 前三个通道的平均透射率均大于 96%, 而 11.5~12.5  $\mu\text{m}$  通道的平均透射率大于 94%, 完全满足了风云二号扫描辐射计对窗口透射率的要求。

同时, 为了满足星上产品的可靠性要求, 分别对所研制的杜瓦窗口增透膜按照系统所要求的试验项目, 进行了如表 1 所示的环境模拟试验, 试验结果表明所研制的窗口增透膜能够经受住系统所要求的破

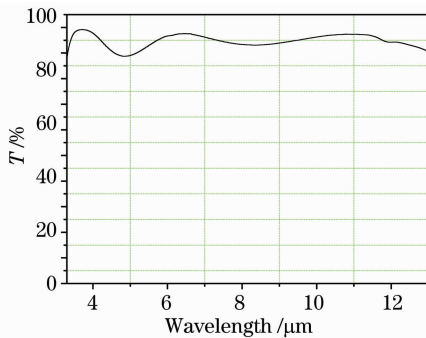


图5 实测透射率光谱曲线

Fig. 5 Measured spectrum curve

坏性试验,完全满足星上产品的可靠性要求。

表1 可靠性试验结果

Table 1 Durability test results for the antireflection coatings on Ge substrate

Test	Result
Adhesion (fast tape)	Pass
45 °C, 8 hours soaking	Pass
24 hours high temperature and high humidity	Pass
High and low temperature impact	Pass

## 5 结 论

以  $\text{YbF}_3$  作为低折射率材料与  $\text{ZnS}$ ,  $\text{Ge}$  等常规红外镀膜材料相配合,采用非对称等效层理论设计多层膜结构的红外宽光谱增透膜,同时将各材料光学常数的拟合值代入到膜层的设计及优化中,研制出实际光谱曲线与理论设计基本相符的宽光谱增透膜。通过工艺优化,所研制的窗口增透膜不仅光学性能达到系统要求,而且能够经受住系统提出的各环境模拟试验的考验,满足了星上产品的可靠性使用要求。

## 参 考 文 献

1 Chen Guilin, Luan Binghui. Multichannel scanning radiometer of FY · 2C meteorological satellite and its on-orbit operation[J]. *Aerospace Shanghai, Supplement*, 2005, **22**: 21~27

陈桂林, 栾炳辉. FY-2C 星多通道扫描辐射计及其在轨运行[J]. *上海航天*, 2005, **22**: 21~27

2 R. R. Willey. High performance AR coatings for germanium [C]. *SPIE*, 1988, **1019**: 119~121

3 C. Cole, J. W. Bowen. Synthesis of broadband anti-reflection coatings for spaceflight infra-red optics [C]. *SPIE*, 1994, **2210**: 506~515

4 R. Hunneman, G. J. Hawkins. The manufacture and spectral assessment of the filters and antireflection coatings for use in the HIRDLS instrument [C]. *Infrared Spaceborne Remote Sensing VI, SPIE*, 1998, **3437**: 378~390

5 F. Lemarquis, E. Pelletier. Buffer layers for the design of broadband optical filters[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(25): 5665~5672

6 Xu Jiangfeng, Chen Qiuling. Anti-reflection coating designed by genetic algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1271~1275

徐江峰, 陈秋灵. 增透膜的遗传算法设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1271~1275

7 J. A. Dobrowolski. Antireflection coatings: key optical components [C]. *Advances in Optical Thin Films II, SPIE*, 2005, **5963**: 596303-1~596303-12

8 Li Zhongqi. High efficiency and wide-range anti-reflection coatings in the infrared region [J]. *Acta Optica Sinica*, 1983, **3**(3): 253~258

李忠奇. 红外高效率/宽带减反射膜[J]. *光学学报*, 1983, **3**(3): 253~258

9 Ma Xiaofeng, Wang Dan, Liu Dingquan *et al.*. Design of non-polarizing broadband antireflection coating using equivalent layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 563~566

马小凤, 王丹, 刘定权等. 利用等效层的消偏振宽带减反射膜设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 563~566

10 Wang Wenliang, Xiong Shengming. Multiobjective optimization approach of optical thin film design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 2026~2030

王文梁, 熊胜明. 光学薄膜自动设计的多目标优化方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 2026~2030

11 Yu Tianyan, Zhu Furong, Liu Dingquan *et al.*. Design and deposition of broadband IR antireflection coatings on ZnS lenses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 171~174

于天燕, 朱福荣, 刘定权等. 硫化锌透镜中波红外宽带增透膜的研制[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 171~174

12 Fang Ming, Shao Shuying, Shen Xuefeng *et al.*. Evolution of growth stress of  $\text{HfO}_2$  thin film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1734~1739

方明, 邵淑英, 沈雪峰等.  $\text{HfO}_2$  薄膜生长应力演化研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1734~1739