

6.4 ~ 15 μm 宽带增透膜的设计与制作

李大琪, 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: 红外增透薄膜在航天遥感中有着重要作用. 使用了 Ge、ZnS、YF₃ 3 种材料, 采用 Refinement 计算机辅助设计的方法, 在 Ge 透镜上研制了 6.4 ~ 15 μm 的长波红外增透膜. 结果表明: 所研制的红外增透膜性能优于光机系统的要求, 并在 15 μm 处的透过率达到 79%.

关键词: 光学薄膜; 红外增透膜; Ge 透镜

中图分类号: TB443 **文献标识码:** A

DESIGN AND FABRICATION OF 6.4 ~ 15 μm BROADBAND ANTIREFLECTION COATINGS

LI Da-Qi, LIU Ding-Quan, ZHANG Feng-Shan

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

Abstract: Infrared antireflection coatings are indispensable to space-borne remote sensing system. An antireflection coating on the surface of Ge lens, which had a broadband in the spectral range of 6.4 ~ 15 μm , was designed and fabricated by means of refinement design method and using Ge, ZnS and YF₃. The results shows that the performance of our coating exceeds that required by the remote sensing systems, and the coating has a transmission of 79% at 15 μm .

Key words: optical thin film; IR antireflection coatings; Ge lenses

引言

红外光学系统大多数采用高折射率光学材料(如 Ge)作为透镜和窗口的材料, 这些元件的光学表面大多数都需要镀制红外增透膜以提高红外光能量的透过率, 以便提高红外成像系统的成像质量. 高性能的红外增透膜是红外光学系统的一个关键部分^[1,2]. 目前在关于长波红外增透膜的研究中, 大都集中在一个和某几个红外波段如 3 ~ 5 μm 或 8 ~ 12 μm 等^[3-6], 但在 6.4 ~ 15 μm 这样如此宽广的波段范围内的研究却未见有报道, 而该波段恰恰是航天航空遥感中信息量比较集中的一个波段. 因此, 研究 6.4 ~ 15 μm 宽带增透膜的设计与制作具有重要意义.

本文对使用 Ge、ZnS 和 YF₃ 3 种材料在 Ge 透镜上研制 6.4 ~ 15 μm 长波红外增透膜进行了探讨.

1 膜系设计

制备长波红外薄膜所使用的材料, 应在某特定

红外波段内具有好的透射率、恰当的折射率、高的机械强度和硬度、好的化学稳定性等特征, 而大多介质材料到了长波红外以后都不透明, 因而适合的镀膜材料非常有限, 对于红外长波低折射率材料尤为突出. 这正是制约红外长波宽带增透膜设计与制作的主要因素.

本文选择了在红外区工艺比较成熟的材料 Ge 和 ZnS 分别作为高、中折射率材料. 在低折射率材料的选择中, 发现 Na₃AlF₆ 的透光区为 6.4 ~ 14 μm 、YF₃ 为 6.4 ~ 15 μm . 因此, 我们进一步实验对这 2 种低折射率材料的性能进行了比较. 实验发现: 当 2 种材料膜层过厚, 都出现了膜层脱落的现象, 为此这 2 种材料光学常数的拟合长波端只到了 7 μm . 通过实验得到的 Na₃AlF₆、YF₃ 光学常数如图 1 和图 2 所示.

实验结果分析发现 Na₃AlF₆ 和 YF₃ 相比, Na₃AlF₆ 的 k 值的数量级为 10^{-2} , YF₃ 的 k 值的数量级为 10^{-3} , 同时还发现到了 10 μm 以后, Na₃AlF₆ 和 YF₃ 的透过率都有一定程度的降低, 这是因为材料的吸收所致, 但是相比而言 Na₃AlF₆ 的降低程度更

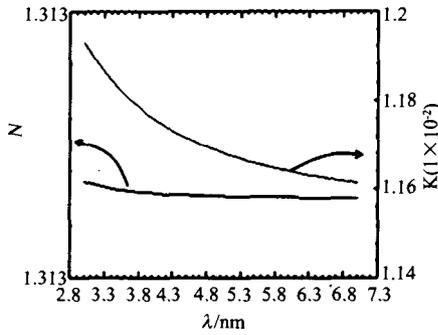


图1 Na₃AlF₆ 光学常数曲线
Fig. 1 Optical constant curve of Na₃AlF₆

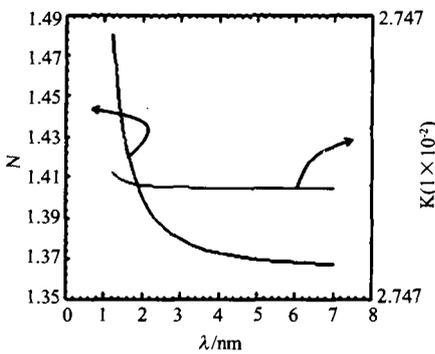


图2 YF₃ 光学常数曲线
Fig. 2 Optical constant curve of YF₃

多,考虑长波端材料的吸收过大不利于实际的膜系镀制,因此决定取 YF₃ 作为低折射率材料.

在选定了使用的镀膜材料以后,下一步的工作就是进行膜系设计.设计的理论依据为多层增透膜的特征矩阵^[4]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{r=1}^n \begin{bmatrix} \cos\delta_r & (i\sin\delta_r)/\eta_r \\ i\eta_r \sin\delta_r & \cos\delta_r \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{n+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\delta_r = \frac{2\pi N_r d_r \cos\theta_r}{\lambda}, \quad \eta_r = N_r \cos\theta_r, \dots (p \text{ 光})$$

$$\eta_r = N_r \cos\theta_r, \dots (S \text{ 光})$$

其中,δ为波长λ的光束在膜中的单向行进的位相厚度,N为薄膜的复折射率,d为薄膜的物理厚度,θ为光束在膜内的传播方向与界面法向方向的夹角,η_j为有效导纳,矩阵 $\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix}$ 定义为基片和薄膜组合的特征矩阵.

式(1)是光学薄膜的理论基础,可以得出一个给定膜系的全部光学特性.在增透膜的设计中,如果某膜层所要求的折射率不现实,则可用一个三层对称组合膜来代替,使组合膜的总光学厚度与所要求的单层膜相近.

在设计中,采用 Refinement 的计算机辅助设计的方法进行膜系设计,Refinement 方法是设计已知膜层数量的初始膜系,通过修改其折射率和厚度,使膜系的光谱性能到达所需的指标.所设计的初始膜系结构为

空气 | N L N H N | 基底 | N H N L N | 空气
其中,用 H 代表 Ge, N 代表 ZnS, L 代表 YF₃. 设计 λ 为 1.2 μm.

根据材料实验所得到的结果,使用光学薄膜设计软件 Filmwizard 对初始膜系设计进行优化,以各层厚度作为变量进行搜索,其优化的结果如下:

空气 | 1.249N 3.5L 6N 2.209H 1.691N | 基底 | 1.69N 2.21H 6N 3.5L 1.248N | 空气
其最终设计结果如图 3 所示.

2 制作

薄膜的制作是在北京光学仪器厂生产的 DM-450 型镀膜机上完成的.在整个镀制过程中,采用光学监控的方法,通过改变控制波长的极值法,实现对非规整膜系的膜厚控制.使用 Perkin Elmer Spectrum GX 红外傅里叶光谱仪对增透膜在室温下的光学性能进行测量,光谱分辨率为 4cm⁻¹.

通过实验确定出了最佳工艺参数:本底真空度为 2.5 × 10⁻³ Pa;镀 Ge 的蒸发电流在 160A 左右;ZnS 的蒸发电流在 280A 左右;YF₃ 的蒸发电流在 300A 左右;烘烤温度为 230℃ 左右,烘烤时间为 3h.

3 结果与讨论

图 4 为我们在 Ge 透镜上实际制作的 6.4 ~ 15 μm 的长波红外增透膜的光谱性能结果.实测样品的光谱性能和设计结果相比,在 12 μm 以后出现透过率逐渐降低.分析其主要原因是所采用的薄膜

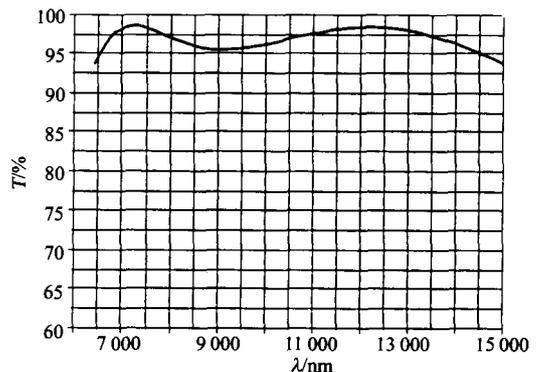


图3 设计的透过率曲线
Fig. 3 Designed transmission's curve

材料在此波段以后的吸收逐渐增大.即使这样,所研制的红外增透膜的光谱性能均已达到并超过了在通常航空航天遥感应用所要的性能指标,证明上述方案是可行的.

对所研制的增透膜进行环境实验,实验结果为表 1 所列.

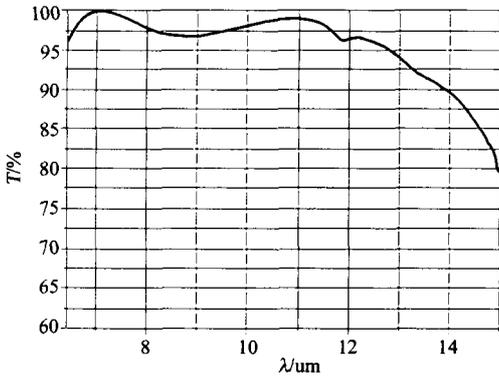


图 4 实测样品透过率曲线

Fig. 4 Measured transmission's curve

表 1 环境实验结果

Table 1 Durability test results

实验样品	胶带快速撕拉	摩擦试验	45℃温水浸泡 8h
所制样品	通过	通过	通过

4 结语

本文使用了 3 种不同的高、中、低折射率材料,采用 Refinement 方法进行膜系设计,通过多次实验,

制备出了用于空间工程的长波红外宽带增透膜.膜系的设计及制备都取得了良好的效果,为以后工程项目红外光学系统的增透部件的制备打下了良好的技术基础.如果在未来的研究中能够找到一种长波红外性能更为优异的低折射率材料,将会使长波红外增透膜的性能得到进一步提高.

REFERENCES

- [1] XU Xiao-Feng, ZHANG Feng-Shan, FAN Bin. Study on antireflection coatings of broad angle incidence in 1500 ~ 1600nm by rugate coatings [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐晓峰,张凤山,范滨.利用 Rugate 膜系理论实现宽角度入射 1500~1600nm 波段减反射薄膜的研究. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(3): 185—188.
- [2] HONG Dong-Mei, CHEN Sheng, CAO Hai-Yun, et al. Infrared optical thin films [J]. *Optical Instruments* (洪冬梅,陈生,曹海云,等.红外用光学薄膜. *光学仪器*), 2004, 4(24): 204—206
- [3] DING Tie-Zhu, LIU Qiang. A study on the preparing technique of the 10.6 μm infrared coating [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol* (丁铁柱,刘强. 10.6 μm 红外膜系制备工艺研究. *内蒙古大学学报*), 2002, 33(6): 647—651.
- [4] ZHU Ling-Xin, ZHANG Ling. Research of long-wave infrared optical filters [J]. *Optical Instruments* (朱玲心,张麟.长波红外光学薄膜器件研究. *光学仪器*), 1999, 21(4-5): 153—155.
- [5] TANG Jin-Fa, ZHENG Quan. *Applied Thin Film Optics* [M]. Shanghai: Science Press Shanghai (唐晋发,郑权. *应用薄膜光学*.上海:上海科学出版社), 1980, 49—51.
- [6] LIN Bing, YU Tian-Yan, LIU Ding-Quan, et al. Design and deposition on of infrared/visible wideband color separation filters [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林炳,于天燕,刘定权,等.红外/可见光宽带分色片设计与制备. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(5): 393—395.