

# 红外探测器窗口和光学镜头镀膜技术

李 忠 奇

(昆明物理研究所)

红外探测器问世以来,为配合窗口和透镜的制备,红外波段镀增透膜技术得到了蓬勃发展。红外波段应用的大多数材料是 Ge, Si, PdTe, ZnSe 和各种红外玻璃。这些材料折射率高,反射损失大。举 Ge 片为例,其  $n_s = 4$ , 表面反射损失  $R_s = 36\%$ , 与常用冕牌玻璃 ( $n_s = 1.52$   $R_s = 4.2\%$ ) 相比,约高十倍。这种表面反射损失降低了透射率和增加了光学系统杂散光的影响。在光学系统中,当光学零件增多时,上述影响特别严重。但是在零件表面镀增透膜后就可克服上述缺点。图 1 给出锗和玻璃零件表面镀膜前和后,系统总透射率  $T_m$  与零件数  $N$  的关系。单个 Ge 零件未镀膜时,  $T_s = 47\%$ ; 镀 SiO 后,  $T = 99\%$ 。单个玻璃零件未镀膜时,  $T_s = 91.9\%$ ; 镀 MgF<sub>2</sub> 后,  $T = 98\%$ 。图 2 表示在一个系统中杂散光  $\rho$  随零件数  $N$  和表面反射率的变化情况。

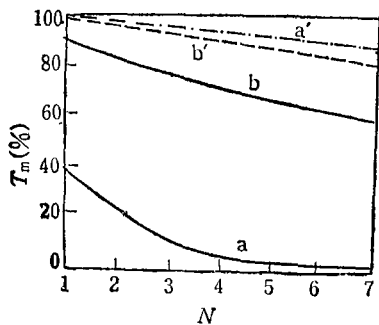


图 1

a——Ge 零件镀膜前;  
a'——Ge 零件镀膜后;  
b——玻璃零件镀膜前;  
b'——玻璃零件镀膜后

在红外技术领域,可以毫不夸张地说,红外光学零件不镀膜就不能应用。因此,红外膜的研究受到重视。近年来随着红外探测器的推广

物理

应用,红外增透膜的工作有了较大进展。本文将重点介绍单层膜、高效膜和硬碳膜(又称类金刚石膜)的设计和应用。

## 1. 单层增透膜

单层增透膜在理论上和实验上都是比较简单的,假定材料无吸收时,推出基片的反射率  $R_s$  和透射率  $T_s$  与折射率  $n_s$  的关系<sup>[1,2]</sup> 为

$$R_s = \frac{(n_0 - n_s)^2}{(n_0^2 + n_s^2)}, \quad (1)$$

$$T_s = \frac{2n_0n_s}{(n_0^2 + n_s^2)}. \quad (2)$$

同理可推出镀一层膜 ( $n_1d = \frac{\lambda}{4}$ ) 以后的反射率  $R$  和透射率  $T$  的公式为

$$R = (n_0n_s - n_1^2)^2 / (n_0^2n_s^2 + n_1^4), \quad (3)$$

$$T = \frac{2n_0n_s n_1^2}{(n_0^2n_s^2 + n_1^4)}, \quad (4)$$

式中  $n_0$  为空气折射率 ( $n_0 = 1$ ),  $n_s$  为基片折射率,  $n_1$  为镀层折射率。锗零件镀 ZnS 膜,  $n_s = 4$ ,  $n_1 = 2.20$  代入上式,得镀膜前  $R_s = 53\%$ ,  $T = 47\%$ ; 镀膜后反射率降低,  $R_s = 2\%$ , 透射率上升,  $T = 98\%$ 。对于硅零件镀 SiO 膜,  $n_s = 3.5$ ,  $n_1 = 1.9$ , 同理得镀膜前  $R_s = 47\%$ ,  $T_s = 53\%$ ; 镀膜后  $R = 0.1\%$ ,  $T = 99.9\%$ 。计算表明 ZnS 和 SiO 是 Ge 和 Si 的最好膜

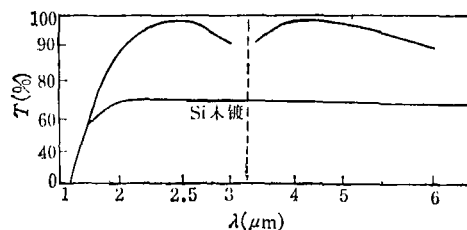


图 2 Si 基片镀 SiO 的实测透射率曲线

料.它们用电阻加热或电子枪加热都容易蒸发.1966年我们首次作了报道,实验结果见图2和3,并与理论计算一致.国外五十年代已有报道<sup>[3]</sup>.六十年代得到了极为广泛的应用.

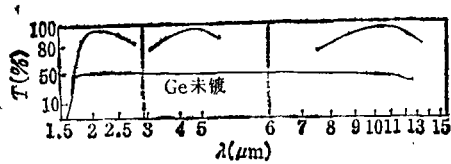


图3 Ge基片镀ZnS在三个大气窗波段的实测透射率曲线

## 2. 高效膜

为了改善红外仪器的性能,除要求探测器芯片有较高的灵敏度外,对探测器窗口和光学系统中的透镜都要求高透射率.由于单层膜平均透射率低,在8—14 $\mu\text{m}$ ,  $T < 90\%$ ; 在2—13 $\mu\text{m}$ ,  $T < 70\%$ ,不能满足使用要求,因而七十年代开始了多层增透膜研究<sup>[4]</sup>.八十年代初国外已有红外多层膜产品,国内八十年代初研究成功<sup>[5,6]</sup>,现处于改进和推广应用阶段.

对红外多层增透膜的设计方法,主要是采用递减法.由于红外膜料少,难于找到满足设计要求的材料,解决的办法是优选对称三层膜的厚度<sup>[5,7]</sup>.我们借助于日本池田英生非对称三层膜理论的组合折射率实现了高效膜<sup>[8]</sup>.非对称三层膜等效折射率  $N^*$  和相位  $\Theta^*$  有下列关系式:

$$N^* = N \left( 1 \pm \frac{\Delta n}{n_c} \right) \quad (5)$$

$$\Theta^* = 2\pi N^* D^* / \lambda, \quad (6)$$

式中  $N$  为三层对称膜系的等效折射率,  $\Delta n = |n_a - n_c|$ ,  $n_a$  和  $n_c$  分别为材料折射率,  $D^*$  为组合折射率的几何厚度.用上述方法设计的通用膜系为

$$A \left| KL_1 \left( \frac{h}{2} L_1 \frac{h}{2} \right)^s KL_3 \left( \frac{h}{2} H \frac{L_3}{2} \right)^t \right| \text{Ge}_{\text{基膜}}$$

膜系中  $s$  为周期数,  $K$  为层厚的调整系数,  $L_1$  为  $\text{CaF}_2$  ( $n_1 = 1.26$ ),  $h$  为  $\text{ZnSe}$  ( $n = 2.5$ ),  $L_3$  为  $\text{ZnS}$  ( $n_3 = 2.2$ ),  $H$  为  $\text{Ge}$  ( $n = 4$ ). 选择不同的  $K$ ,  $S$  和控制波长,就可得到不同波段的高效率膜.图4给出  $K = 1$ ,  $S = 1$ ,控制波长分别

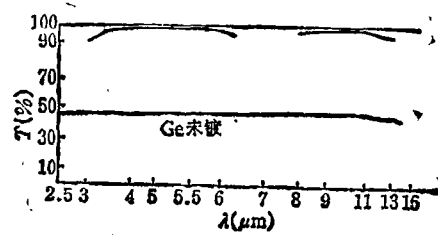


图4 高效率增透膜实测透射率曲线

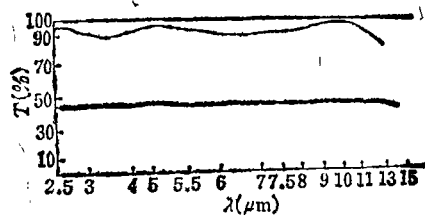


图5 宽带膜实测透射率曲线

为  $\lambda_0 = 1.2\mu\text{m}$  和  $\lambda_0 = 3.5\mu\text{m}$  的实测透射率曲线.图5给出  $S = 1$ ,  $K = 3.5$ ,  $\lambda_0 = 1.1\mu\text{m}$  的实测透射率曲线.由图4和5可看出,在3—5 $\mu\text{m}$ 和8—12 $\mu\text{m}$ ,平均透射率  $T \approx 97-98\%$ ,故称为高效膜,达到英国 Barr 公司1981年的产品水平.在2—13 $\mu\text{m}$ 平均透射率  $T \geq 93\%$ ,与美国 OCLI 公司1980年的水平相当.目前已提供国内二十多个单位试用.

## 3. 硬碳膜(类金刚石膜)

硬碳膜技术被誉为是八十年代新技术,很受各国科学工作者的重视.并已研究出许多制备方法,为了表征各个方法的特色,命名为类金刚石膜、 $\alpha$ -碳膜或  $i$ -碳膜 ( $i$ -C膜)等<sup>[9-11]</sup>.按这些膜的沉积过程,大体可分为:低能碳离子沉积法和射频等离子分离碳氢气体沉积法.用这些方法制备的薄膜有类似的特性.最突出的特点是硬度高,故称硬碳膜或类金刚石膜.文献[12]报道的碳膜和克氏(Knoop)的硬度为1250—1650 $\text{KP}/\text{mm}^2$ ,比宝石1370 $\text{KP}/\text{mm}^2$ 还高.文献[13]报道,无氢非晶碳膜维氏(Vickers)的硬度为18000 $\text{KP}/\text{mm}^2$ ,甚至比金刚石12000 $\text{KP}/\text{mm}^2$ 还要高;它的化学性能稳定,一般酸、碱、盐对它无腐蚀作用;红外光学特性好,红外透射波段可达50 $\mu\text{m}$ ,折射率为1.80—2.30,并且可变,与Ge, Si,玻璃和铝等材料附着好<sup>[14]</sup>.我们采用射频等离子分离碳氢化合物

表 1 昆明物理研究所红外光学镜头(窗口)镀膜后的性能指标<sup>[16]</sup>

波长(偏差 ±0.2)μm	3—5	8—12	2—13	3—14	2—15
适用大气窗	2	3	1—3	2—3	1—3(任一个)
平均透射率(%)	96—98	96—98	91—93	91—93	<70
峰值透射率(%)	98—99	98—99	98—99	98—99	92—98
强度	2—1 级				超强级
温度冲击(°C)	-196—+300	-196—+200	-196—+200	-196—+200	-196—+300
零件形状	平面、球面(凸凹)、非球面和实心多面体(转鼓)				
膜层数	多层	多层	多层	多层	单层

的方法,在 Ge 基片两面沉积硬碳膜获得成功。图 6 为实测透射率曲线。膜层强度在强度机上做磨擦检验,刷子上加法码 200g,在沙和水之比为 1 比 10 的混合液中能通过 6 万转以上的磨擦。这相当于英国检查超强膜标准(DEFSTAN07-55TYP5),故称超强膜。经温度冲击(从 -196°C—+200°C),而后浸泡在 5%酸、碱和盐溶液中各 24 小时后,其外观和光学特性无任何变化。由图 6 看出:峰值透射率都未超过 93%(实测为 92%),这是由于硬碳膜在 8—14μm 本征吸收的影响<sup>[17]</sup>。为了提高透射率,在 Ge 片的一面镀硬碳膜(向外),而另

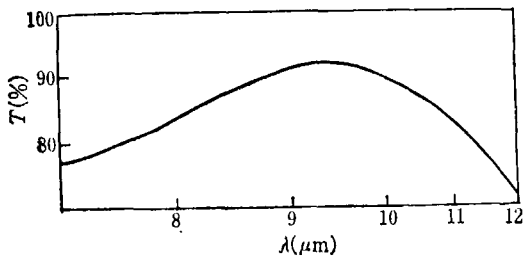


图 6 8—12μ, Ge 基片两面镀硬碳膜实测透射率曲线

一面(向仪器内)镀高效膜。图 7 为这种设计的实测透射率曲线。在 8—11.5μm, 平均透射率  $T \geq 90\%$ 。这个结果超过英国 Barr 公司 1981 年公布的产品水平 ( $T \geq 87\%$ )。

物理

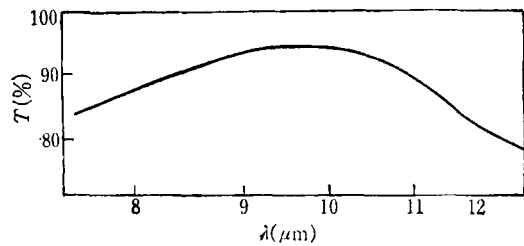


图 7 Ge 基片一面镀碳膜,另一面镀高效膜的实测透射率曲线

用硬碳膜来改善高效膜强度方面也取得了可喜的进展。在保持高效膜(如图 4 和图 5 所示)透射率基本不变的情况下,膜的机械强度由四级提高到二级(少数达一级),故称这种膜为高效高强膜。这种膜具有更广泛的使用价值。

在结束本文之前,引用表 1 供读者参考。近年来从国外引进的红外仪器和探测器,几乎全是镀多层膜。部分探测器窗口还采用前截止滤光片。

### 参 考 文 献

- [1] H. A. Macleod, Thin-Film Optical Filters, Adam Hilger, London, (1969), 36—42.
- [2] P. W. Kruse, Elements of Infrared Technology, John Wiley & Sons, New York, London, (1961), 138.
- [3] J. T. Cox and G. Hass, J. Opt. Soc. Am., 48(1958), 667.
- [4] E. L. Church, S. R. Nagell et al., Appl. Opt., 13

- (1974), 1274.
- [5] 许步云, 红外研究, 1(1982), 71.
- [6] 李忠奇, 光学学报, 3(1983), 253.
- [7] J. T. Cox and G. Hass, *Physics of Thin Films*, Academic Press, New York, (1964), 275.
- [8] 池田英生, 特许公报, (1978), 昭 53-10861.
- [9] L. Holland and S. M. Ojha, *Thin Solid Films*, 38 (1976), L17.
- [10] T. J. Morovec, *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, Vol. 325 (Optical Thin Films), Ed. R. I. Seddon, Los Angeles, California, (1982), 117.
- [11] 郑海涛, 毛利敏男, 难波义捷, 真空, 26(1983), 26.
- [12] A. Bahener et al., *Optical Engineering*, 23(1984), 153.
- [13] A. V. Balakov and E. A. Konshina, *Sov. J. Opt. Technol.*, 49(1984), 591.
- [14] 左名光, 红外技术, 3(1985), 35.
- [15] K. Enke, *Appl. Opt.*, 24(1985), 508.
- [16] 李忠奇, 红外技术, 3(1985), 41.

(上接第 92 页)

透镜表面沉积  $10\mu\text{m}$  保护层, 可防止透镜表面刻痕。红外光谱中常用的 NaCl, KCl 和 CsI 棱镜或窗片, 容易潮解, 若用氟类单体等离子体聚合膜覆盖, 可以防潮, 并且不影响光学性能。

等离子体聚合膜在生物医学方面的应用是很有前途的。聚氯乙烯 (PVC) 是良好的医用材料, 常用于制作输血管, 血液分析器及贮血袋以及人造血管等, 但管内壁容易凝血, 经过等离子体表面活化和接枝聚合后, 可显著提高抗凝血性。等离子体聚合膜还可降低人造脏器中对人体有害的增塑剂 (DOP) 的渗出。已有试验表明, 在医用材料上沉积乙烯、四氟乙烯等单体的等离子体聚合膜, 可改善血液相容性及机体相容性。在隐形眼镜上沉积  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{H}_2\text{O}/\text{N}_2$  混合等离子体聚合膜, 可显著改善亲水性及与人体亲和性。选择性渗透膜在释放速率可以控制的系统中作扩散筛, 用作药物的缓释膜。

此外, 硅烷辉光放电等离子体聚合非晶态硅/氢“合金”膜可以作太阳能电池, 具有优良的光学和电学特性。甲烷的等离子体聚合可制备人造金刚石, 其硬度与天然金刚石相同。

七十年代以来, 低温等离子体越来越引起人们的注意。在我国, 离子镀设备的研制, 装饰镀工作和工具镀工作已在不少单位中开展。等离子体刻蚀设备自己开始研制, 同时引进国外技术。微米级条纹加工也已开始试验。山羊毛等离子体净洗, 兔毛等离子体改性, 苧麻脱胶, 化纤表面等离子体接枝, 塑料表面改性, 以及等离子体聚合膜研制等已经进行了许多工作, 污水等离子体处理以及用于提高催化剂活性的等离子体处理也在试验中。

### 参 考 文 献

- [1] H. V. Boenig, *Plasma Science and Technology*, Carl Hanser Verlag, München Wien, (1982), 260.
- [2] J. R. Hollahan and A. T. Bell, *Techniques and Applications of Plasma Chemistry*, John Wiley, New York, (1974), 113.
- [3] C. I. Simicnescu and F. Dénes, *Cellulose Chem. Techn.* 14(1980), 285.
- [4] 井手文雄(日), 表面, 20-2(1982), 102.
- [5] 広津敏博(日), 表面, 20-8(1982), 446.
- [6] 田民波, 真空应用, 1-1(1985), 4.
- [7] 洪明苑, 物理, 13-1(1984), 56.
- [8] 洪明苑、胡建芳, 物理, 15-3(1986), 163.