

水汽对低温光学元件污染的研究

郭 晴 裴云天

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

兰增瑞

(航天工业总公司 509 研究所, 上海, 200240)

摘要 就水汽对光学元件的污染进行了定量的分析、测试, 建立了水汽冷凝膜在 $5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 和 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 的波段的吸收模式. 实验结果与理论计算相吻合, 测试精度优于 3%.

关键词 水汽, 污染, 透射率.

引言

大气中普遍存在的水汽在低温下极易吸附于物体内部和表面. 水汽冷凝霜层在红外波段有强烈的吸收, 因此, 水汽的低温污染严重地影响空间遥感仪器探测器窗口的光学效率及系统使用寿命. 国外文献主要报道了关于光学元件表面低温污染导致辐射计探测灵敏度衰减的验证; 低温冷凝膜折射率、厚度及冷凝量的测定; 低温污染过程中反射特性的衰减; 低温污染引起表面散射、反射角分布及透射角分布等光学特性的改变等^[1-4]. 实验证实了低温污染严重地影响了光学元件的光学特性. 实验室测定冷凝膜折射率、冷凝膜厚度及冷凝量的重复精度达 2%, 水汽冷凝膜密度为 $0.49\sim 0.93\text{g}/\text{cm}^3$.

本文针对气象卫星的实际工作波段 $5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 和 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 研究了水汽对低温光学元件表面污染的过程中透射特性的变化, 建立了水汽冷凝膜的吸收模式, 并明确了其吸收峰.

1 理论分析

低温污染导致透射特性衰减的实质是冷凝膜对入射辐射的吸收, 按布给-朗伯 (Bouguere-Lambert) 定律:

$$I = I_0 \exp(-ad), \quad (1)$$

式(1)中 I_0 为入射辐射, d 为冷凝膜厚度, a 为吸收系数. 假设冷凝膜密度为 ρ , 冷凝量为 M ,

凝结面积为 A , 记冷凝膜透射率为 τ , 则

$$M = \rho d A, \quad (2)$$

$$\tau = \exp(-aM/\rho A). \quad (3)$$

在确定的温度和压力下并且在一定的厚度范围内, 可以认为 $\alpha(\lambda)$ 和 ρ 为定值, 只在严格控制凝结面积 A , 便可获得特定污染程度 M 下的 $T-\lambda$ 关系.

光学元件低温污染测试系统原理框图如图 1 所示.

光学元件低温污染测试系统的工作原理如下: 测温控温系统使样品处于某一温度, 抽气系统使样品室达到高真空, 供气系统向样品室输入定量的污染气体(如水汽), 使之完全凝结在样品表面, 经红外分光光度计测量, 从而获得污染样品的透射比曲线, 并可以推算出冷凝膜的吸收系数. 镀膜锗片污染后的表面结构如图 2 所示.

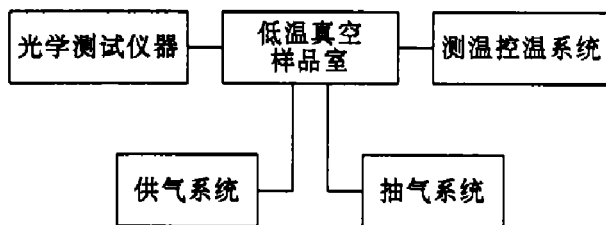


图 1 光学元件低温污染测试系统原理框图
Fig.1 Schematic diagram of the system for measuring contamination on optical surface

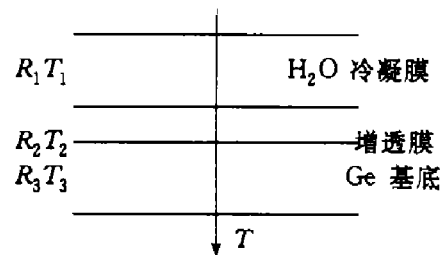


图 2 镀膜锗片污染后的表面结构
Fig.2 Surface structure of the coated Ge with contamination

单层膜的反射率和透射率为

$$R = \rho_a + \frac{\rho_b(1-\rho_b)^2 t^2}{1-\rho_a \rho_b t^2}, \quad (4)$$

$$T = \frac{(-\rho_a)(1-\rho_b)t}{1-\rho_a \rho_b t^2}. \quad (5)$$

菲涅尔反射比为

$$\rho_a = \frac{(n_1 - 1)^2 + k_1^2}{(n_1 + 1)^2 + k_1^2}, \quad (6)$$

$$\rho_b = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k_1^2}{(n_2 + n_1)^2 + k_1^2}. \quad (7)$$

透射系数为

$$t = \exp(-ad) \quad (8)$$

吸收系数为

$$a = 4\pi k/\lambda. \quad (9)$$

已知各介质的折射率 n 及消光系数 k , 可求得 $R_1, T_1, R_2, T_2, R_3, T_3$, 再由下式, 可求得镀膜锗片污染后透射比

$$T = \frac{T_1 T_2 T_3}{(1 - R_1 R_2)(1 - R_2 R_3) - R_1 R_3 T_2^2} \quad (10)$$

同理,对于不锈钢表面污染,总反射比为

$$R = R_1 + \frac{R_2 T_1^2}{1 - R_1 R_2} \quad (11)$$

联立式(4)、(5)和(11)得:

$$at_1^4 + bt_1^2 + c = 0, \quad (12)$$

其中,

$$a = R_2(1 - \rho_{1a}R - 2\rho_{1a})[\rho_{1a}(1 - R_2)^2 + R_2(1 - \rho_{1a}R_2)],$$

$$b = -R_2\{(1 - \rho_{1a}R - 2\rho_{1a})[(1 - R_2)^2 + (1 - \rho_{1a}R_2)] + R_2(R - \rho_{1a})(1 - \rho_{1a}R_2)\},$$

$$c = (R - \rho_{1a})(1 - \rho_{1a}R_2).$$

已知不锈钢表面的反射率 R_2 及表面污染后的反射比 R ,且 $t_2 = 0$,则可由式(12)解得透射系数 t_1 .

水汽冷凝膜有较高的吸收系数,当冷凝膜厚度足够大时必须考虑散射效应.记冷凝膜无散射时的透射系数为 t_1 ,有散射时的透射系数为 t_{1s} ,则:散射系数为

$$\sigma = 1/d \ln(t_1/t_{1s}), \quad (13)$$

透射系数为

$$t_{1s} = \exp[-(\alpha + \sigma)d]. \quad (14)$$

据文献[5]报道,不锈钢表面受水汽污染时的反射比曲线如图3所示.

根据多光束反射理论计算镀膜锆片透射比曲线如图4所示.图4表明,水汽冷凝膜对2~12.5 μm 波段的吸收相当严重,当水汽冷凝膜生长到30 μm 时,镀膜锆片的平均透射比衰减到10%以下,扫描辐射计已无法正常工作.因此,只要对冷凝膜厚度 $d = 1 \sim 30\mu\text{m}$ 的状况进行分析足以说明问题.

2 测试实验

2.1 样品本底透射比及静态保持透射比的测试

对系统抽真空同时进行烘烤除气,样品室内部烘烤温度为70 $^{\circ}\text{C}$,外部玻璃系统烘烤温度约为340 $^{\circ}\text{C}$,烘烤时间达10h.此时BA规测量显示系统极限真空度为 $4.26 \times 10^{-4} \text{Pa}$.测得的300K镀膜锆片的透射比见图5中的曲线1;经液氮降温,测得90K样品的透射比见图5中的曲线2.关静态阀,测试静态保持10min、20min和30min后,90K样品的透射比分别见图5中的曲线3、4和5.

300K样品透射比较90K样品透射比低,这是由锆的材料特性所决定的.270K时锆的

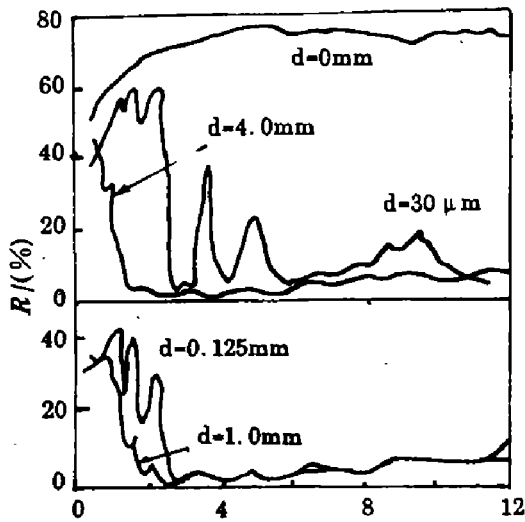


图 3 不锈钢表面受水汽污染时的反射比曲线
Fig. 3 Reflectance of stainless steel surface with H₂O contamination

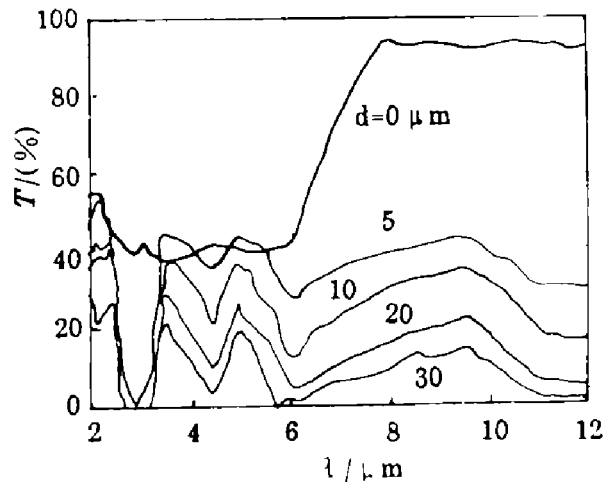


图 4 镀膜锗片表面受水汽污染时的理论透射比曲线
Fig. 4 Theoretical transmittance of the coated Ge with H₂O contamination

折射率为 4.0, 而 94K 时锗的折射率为 3.94^[6], 锗片透射率 $T = 2n / (n^2 + 1)$, 随温度下降, n 减小, 因而 T 增大. 同时, 低温下材料晶格振动减小, 因而散射损失变小, 也可使 T 增大.

90K 样品的本底透射比曲线与静态保持透射比曲线几乎全部重合, 这表明系统内可凝性气体极少. 液氮降温 and 静态保持过程中, 系统本身不发生透射率衰减, 因而可以认为在 30min 的实验过程中, 由于系统本身剩余水汽分子低温吸附引起的透射比的衰减可以忽略不计.

2.2 透射比随冷凝量的变化关系

对系统抽真空同时进行烘烤除气, 10h 后真空度达 4.93×10^{-4} Pa.

90K 镀膜锗片被水汽污染时的光谱透射比曲线如图 6 所示. 经液氮降温, 测试 90k 样品的本底透射比见图 6 中曲线 0. 关静态阀, 分段释放水汽, 测试不同污染程度下的透射比分别见图 6 中曲线 1~15. 图 6 中各曲线相对应的水汽冷凝量如表 1 所示.

实验过程中, 样品温度为 -183°C , 套筒温度为 13.6°C , 室温为 24°C , 因而可以保证所有释放的水汽全部凝结在限定的样品表面.

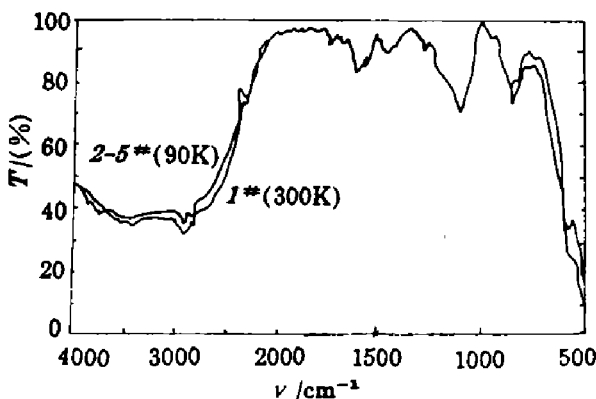


图 5 样品本底透射比及静态保持透射比曲线
Fig. 5 The background transmittance and statistically maintained transmittance

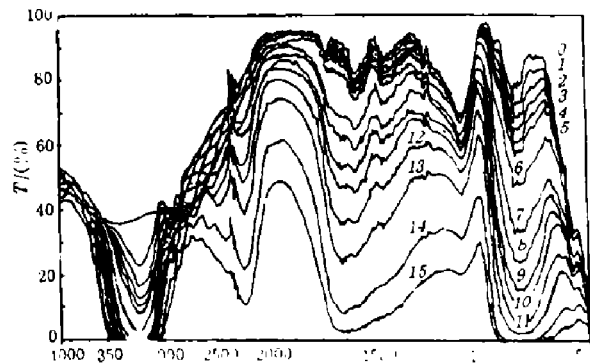


图 6 90K 镀膜锗片被水汽污染时的光谱透射比曲线
Fig. 6 Spectral transmittance of the coated Ge with H₂O contamination at 90K

由图 6 可见,在 3220cm^{-1} ($3.1\mu\text{m}$)、 2250cm^{-1} ($4.4\mu\text{m}$) 和 816.4cm^{-1} ($12.2\mu\text{m}$) 波长有明显的水汽冷凝膜吸收峰,在 1700cm^{-1} ($5.8\mu\text{m}$) 附近也有稍弱的吸收峰.

表 1 光谱透射比曲线对应单位面积的水汽冷凝量 m
Table 1 H_2O cryodeposit corresponding to spectral transmittance

No.	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
$m(\times 10^{-6})$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0	7.22	13.8	20.8	28.1	35.7	70.3	147.3
No.	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]	14 [#]	15 [#]
$m(\times 10^{-4})$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	2.09	2.76	3.44	4.88	7.01	13.96	22.03	35.47

2.3 重复性试验

对高真空的样品室用液氮将样品温度降到 90K,关闭静态阀,释放水汽,测试其透射比曲线 1(见图 7).重复进行 4 次实验,每次释放等量的水汽,测试透射比,分别见图 7 中曲线 2~5.由图 7 可见重复性较好.

在 $5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 波段,透射比的算术平均值 $\bar{x}=0.6486$,标准偏差 $\sigma=0.0120$,极限误差 $\Delta=\pm 3\sigma=\pm 3.6\%$;在 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 波段,透射比的算术平均值 $\bar{x}=0.4568$,标准偏差 $\sigma=0.0114$,极限误差 $\Delta=\pm 3\sigma=\pm 2.3\%$.

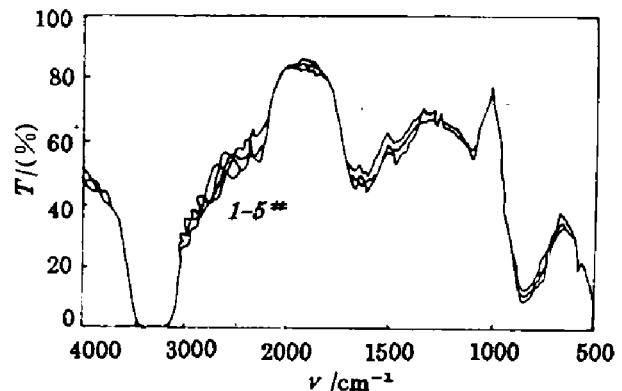


图 7 5 次重复性测试的透射比曲线
Fig. 7 Transmittance of repeated measurements by fivetimes

3 结果分析与讨论

3.1 实验结果与理论计算的比较

根据多光束反射的理论,由已知不锈钢表面被水汽污染后反射比可以计算镀膜锆片被水汽污染后的光谱透射比(见图 4).若采用文献[7]中的水汽冷凝膜密度 $0.917\text{g}/\text{cm}^3$,那么当凝结厚度 $d=5\mu\text{m}$ 时,在 $10.0\sim 12.0\mu\text{m}$ 波段锆片的光谱透射比衰减量为 $\Sigma\Delta T/\Sigma T_0=65.37\%$.实测水汽污染后的锆片光谱透射比如图 6 和表 1 所示.

当 $\rho=0.917\text{g}/\text{cm}^3$,用插值法计算可得凝结厚度 $d=5\mu\text{m}$ 时,在 $10.0\sim 12.0\mu\text{m}$ 波段的锆片的光谱透射比衰减量为 $\Sigma\Delta T/\Sigma T_0=65.37\%$.实测水汽污染后的锆片光谱透射比如图 6 和表 1 所示.

当 $\rho=0.917\text{g}/\text{cm}^2$,用插值法计算可得凝结厚度 $d=5\mu\text{m}$ 时,在 $10.0\sim 12.0\mu\text{m}$ 波段的锆片的光谱透射比衰减量为 $\Sigma\Delta T/\Sigma T_0=66.27\%$.这一结果与实验结果基本是一致的.

3.2 水汽冷凝膜对红外波段的吸收模式

图 6 表明水汽冷凝膜在红外波段有强吸收峰,在 3220cm^{-1} 波长,对曲线 0~6 作指数回归,则 $T/T_0=0.7720e^{-32948.78m}$,相关系数 $r=-0.9830$.在 2250cm^{-1} 波长,对曲线 0、7~15 作指数回归,则 $T/T_0=0.9720e^{-853.45m}$,相关系数 $r=-0.9994$.在 816.4cm^{-1} 波长对曲线 0

~12 作指数回归,则 $T/T_0 = 0.9203e^{-5174.63m}$, 相关系数 $r = -0.9986$.

显然,水汽冷凝膜对红外波段的吸收呈指数关系,符合布给-朗伯定律. 在 3220cm^{-1} 波长吸收最强,在 816.4cm^{-1} 波长次之,在 2250cm^{-1} 波长吸收较弱,它们的吸收系数分别是 $\alpha = 32948.78\text{cm}^2/\text{g}$, $\alpha = 5174.63\text{cm}^2/\text{g}$ 和 $\alpha = 853.45\text{cm}^2/\text{g}$.

从工程应用考虑,需要了解水汽冷凝膜在 $5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 波段对 260K 黑体辐射的吸收模式,以及在 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 波段对 300K 黑体辐射的吸收模式.

样品加权平均透射率计算公式为

$$\frac{T}{T_0} = \sum W_{\lambda} \left(\frac{T}{T_0}\right)_{\lambda} \quad (15)$$

在 $5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 波段上,样品加权平均透射比为 $T/T_0 = 0.9934e^{-1275.56m}$, 相关系数 $r = -0.9964$. 在 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 波段上,样品加权平均透射比为 $T/T_0 = 0.9092e^{-3653.61m}$, 相关系数 $r = -0.9965$. 可见,水汽冷凝膜对 $5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 和 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 波段红外辐射的吸收也呈指数关系,符合布给-朗伯定律. 在 $5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 波段和 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 波段的加权平均吸收系数分别为 $\alpha = 1275.56\text{cm}^2/\text{g}$ 和 $\alpha = 3653.61\text{cm}^2/\text{g}$.

3.3 误差分析与计算

影响实验精度的主要因素有仪器测量误差、水汽冷凝量误差和流量计读数误差.

PE-983 型红外分光光度计对样品透射比的测量精度优于 0.1%, 考虑到衰减参考光束时引起的误差较大,取 $\Delta_1 = \pm 0.01$.

隔热垫片与样品接触,在其内环表面温度低于水汽露点温度的面积上会凝结少量水汽 ΔM , 对图 6 中曲线 10,水汽冷凝量误差对透射比测量的影响约为 1.71%, 即 $\Delta_2 = 0.0171$.

流量计读数精度为 1mm, 流量计常数 $k = 3.7\text{Pa} \cdot \text{l}/\text{mm}$, 图 6 中曲线 10 的流量读数误差对透射比测量误差的影响约为 0.279%, 即 $\Delta_3 = \pm 2.79 \times 10^{-3}$.

系统误差 $\Delta_s = \Delta_1 + \Delta_2 = 0.0271$; 偶然误差 $\Delta_r = \Delta_3 = \pm 2.79 \times 10^{-3}$; 总误差 $\Delta = (\Delta_s^2 + \Delta_r^2)^{1/2} = 0.0272$. 实验的测量精度优于 3%.

4 结语

$5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 和 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 是气象卫星扫描辐射计的实用波段,水汽冷凝膜对此波段有强吸收,在 $5.5\sim 7.1\mu\text{m}$ 波段,水汽冷凝膜的吸收系数为 $1275.56\text{cm}^2/\text{g}$, 而在 $10.5\sim 12.5\mu\text{m}$ 波段则为 $3653.61\text{cm}^2/\text{g}$. 主要吸收峰值在 $3.1\mu\text{m}$ 、 $4.4\mu\text{m}$ 和 $12.2\mu\text{m}$ 等波长. 水汽冷凝膜对红外辐射的吸收符合布给-朗伯定律,使扫描辐射计的探测率呈指数衰减.

该项研究实验精度优于 3%, 为提高扫描辐射计的探测性能并延长其工作寿命提供了实用价值的数据库.

致谢 上海计量技术研究所孟宪华、杨雪梅和王爱斌等同志为玻璃真空系统的制作和调试做了大量的工作,在实验测试阶段得到中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室陈诗伟、季华美的全力支持与配合,在此致以诚挚的谢意.

参考文献

- 1 Edgar R F. *Winter Wolfgang Tuxinsky*, *AIAA*, 1979, (79-1053), 1
- 2 Pipes J G, Roux J A, Smith A M. *AIAA*, 1978, 16(9), 984
- 3 Seiber B A, Smith A M, Wood B E. *Appl. Opt.* 1971, 10(9), 2086
- 4 Smith A M, Wood B E. *AIAA*, 1978, 16(5), 510
- 5 Wood B E, Smith A M. *AIAA*, 1979, 9(9), 1836
- 6 Icenogle H W, Ben C P, William L W. *Appl. Opt.* 1976, 15(10), 2348
- 7 Liu C K, Tine C L. *AIAA*, 1973, (73-149), 3
- 8 《真空设计手册》编写组, *真空设计手册*, 上册, 北京, 国防工业出版社, 1979
- 9 《黑体辐射数据》编写组, *黑体辐射数据表*, 北京, 科学出版社, 1984

STUDY OF H₂O CONTAMINATION ON A COOLED OPTICAL SURFACE

Guo Qing Pei Yuntian

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

Lan Zeng rui

*(No. 509 Institute of Space Corporation
of China, Shanghai 200240, China)*

Abstract H₂O contamination on a cooled optical surface was quantitatively measured and analyzed. The absorption model of H₂O cryodeposit in 5.5~7.1 μ m and 10.5~12.5 μ m wavebands was established. The results of experiment and theoretical calculation are well conformed. The measurement accuracy is better than 3%.

Key words vapor, contamination, transmissivity.