

中远红外光学薄膜膜层厚度监控的误差分析与监控装置的改进

王进军

北京控制工程研究所

摘要 本文主要阐述了光电极值法的基本原理和反射式膜厚控制装置的误差分析,并且对改进后的膜厚控制装置的实验结果进行了分析和讨论。

关键词 光学薄膜 误差分析 红外滤光片

1 引言

要研制出高性能的中远红外滤光片,依据膜层设计,膜层总数一般需要在100层左右,每一层的薄膜厚度都允许有一定的偏差,如果超出允许偏差量,则无法制备出所设计的薄膜系统,因此在研制膜系过程中,对每层薄膜厚度的精确监控和测量是非常重要的。

目前光学薄膜厚度的监控方法主要分为光学法和石英晶体法,光学方法是测量直接决定光学性质的光学控制方法;石英晶体法主要是利用石英晶体的压电效应来测量薄膜厚度,此方法主要用于近红外和可见光部分的任意膜层厚度的监控。

目前所研制的中心波长为 $15.1\mu\text{m}$ 的卫星用红外带通滤光片,膜层较多,每层膜厚度都为波长的四分之一,因此对于这样厚度整齐的膜系我们选用光学方法监控是十分简便和必要的。针对原有的一套反射式红外膜层厚度监控仪器的缺点和不足,改进研制了监控精度更高的极值法监控装置,不仅提高了生产效率,而且使得研制出的滤光片性能有了更大的提高。

2 极值法监控的基本原理

薄膜的透射或反射率是随着薄膜的厚度变化而变化的,如图1所示。

膜层的振幅透射系数为

$$E_t = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad (2-1)$$

膜层的透射率为

$$T = \frac{n_2}{n_0} \cdot \frac{t^2}{1 + r^2 - 2r \cos\left(\frac{4\pi n_1 d_1}{\lambda}\right)} \quad (2-2)$$

式(2-1)中, $t = t_1 t_2$ $r = r_1 r_2$,由此可见投射光强度为薄膜

厚度 $n_1 d_1$ 的函数,当 $n_1 d_1$ 等于 $\frac{1}{4}\lambda$ 整数倍时,透射率出现极

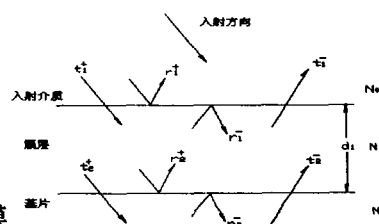


图1 单层介质薄膜的多次反射

值。又因为 $R = 1 - T$, 因此反射光强度也按类似的形式变化。利用镀制膜系过程中出现极值点次数来控制 $\frac{1}{4}\lambda$ 整数倍膜层的方法称之为“极值法”。

3 原有反射式红外膜层厚度监控装置

3.1 结构

如图 2 所示, 红外膜层厚度监控仪器由硅碳棒光源、调制器、光学系统(包括入射组、出射 I 组、出射 II 组)、监控片及换片装置、控制滤光片(窄带)、热敏电阻红外探测器和测控电路组成。

3.2 工作原理

硅碳棒红外光源发出的红外光经过调制器调制后, 由光学系统入射组会聚在监控片上, 然后被监控片反射到光学系统出射组形成平行光, 通过窄带滤光片滤出监控波长, 由热敏电阻红外探测器接收并经过测控电路放大输出, 利用光电极值法的基本原理来监控膜层厚度。

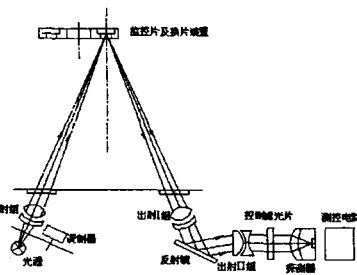


图 2 反射式红外膜层控制装置原理图

3.3 影响仪器监控精度的主要因素分析

(1) 该仪器的测控电路虽然采用了选频放大和精密整流滤波电路, 提高了信噪比, 但实验证明其控制精度只能比传统的极值法提高 1%~2%, 仍然属于传统的极值法范畴。

(2) 该监控装置的精度对光源的稳定性要求比较高, 如果光源信号波动比较大, 则测控精度降低。

(3) 由于采用滤光片获得单色光, 而滤光片的通带带宽的存在, 又破坏了单色性, 因此引入了一定光谱范围的杂散光, 给厚度控制带来了明显的误差。

(4) 由于控制滤光片的采用, 监控波长不具备连续多样化, 不利于在镀制膜系过程中调换监控波长, 镀制膜系工艺受到了限制, 降低了对膜厚的控制精度。

4 改进后的膜厚控制装置

针对原有控制装置的不足, 监控装置进行了改进, 该改进的系统是基于极值法的双光路膜厚控制仪, 它与传统极值法控制的不同之处在于经过调制的光束被一分光镜分成两束, 一束光由一检测器接收后输出一个参考信号, 另一束光经过控制片反射后由另一个检测器接收, 输出测量信号, 测控电路中显示测量信号与参考信号的差值。在未镀膜时, 使参考信号与测量信号平衡, 在蒸发过程中参考信号是恒定不变的, 于是测控电路中显示的仅仅是测量信号中随膜层变化而变化的部分信号, 扩大了变化部分的量程, 大大的提高了膜层厚度的监控精度, 并且对光源的稳定性能的要求也大大的降低了, 同时测控电路仪器改进为弱信号相位锁定放大器, 它由主信号通道、参考信号通道、相关器、先进的四阶滤波器与高精度自动稳零直流放大器组成, 有很强的谐波抑制能力和很宽的动态储备, 与改进前的测控电路相比, 其具有更高监控精度。

5 反射式红外膜层厚度监控装置的误差分析

设在控制 $\frac{1}{4}\lambda$ 波长的单层膜时,在极值点的反射率值的误差为 ν ,膜层的相位厚度 δ_1 对应的误差为 Φ ,

$$\text{则 } \delta_1 = \left(\frac{\pi}{2}\right) \pm \Phi \quad (5-1)$$

当光线垂直入射时,设膜层的折射率为 n_1 ,基片的折射率为 n_2 ,则膜层和基片的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & \frac{i}{n_1}\sin\delta_1 \\ in_1\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

由式(5-1), $\cos\delta_1 = \sin\Phi$, $\sin\delta_1 = \cos\Phi$,得组合导纳为:

$$y = \frac{C}{B} = \frac{in_1\cos\Phi + n_2\sin\Phi}{\sin\Phi + i\frac{n_2}{n_1}\cos\Phi} \quad (5-3)$$

对 $\sin\Phi$ 、 $\cos\Phi$ 进行三角级数展开并计算到二次幂,则有

$$y = \frac{C}{B} = \frac{in_1(1 - \frac{\Phi^2}{2}) + n_2\Phi}{\Phi + i\frac{n_2}{n_1}(1 - \frac{\Phi^2}{2})} \quad (5-4)$$

又因为反射率为: $R = \left(\frac{n_0 - Y}{n_0 + Y}\right)^2$

$$\text{故 } R = \left[\frac{(n_2 - 1)\Phi + i(n_1 - \frac{n_2}{n_1})(1 - \frac{\Phi^2}{2})}{(n_2 + 1)\Phi + i(n_1 + \frac{n_2}{n_1})(1 - \frac{\Phi^2}{2})} \right]^2 \quad (5-5)$$

化简式(5-5)得:

$$R = \frac{(n_1 - \frac{n_2}{n_1})^2}{(n_1 + \frac{n_2}{n_1})^2} \left[1 + \frac{(n_2^2 + 1 - n_1^2 - \frac{n_2^2}{n_1^2})4n_2}{(n_1^2 - \frac{n_2^2}{n_1^2})^2} \Phi^2 \right] \quad (5-6)$$

由式(5-6)可知反射率没有误差时

$$R = \frac{(n_1 - \frac{n_2}{n_1})^2}{(n_1 + \frac{n_2}{n_1})^2}$$

因此 ν 和 Φ 之间有如下关系:

$$\nu = \frac{\left(n_2^2 + 1 - n_1^2 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)4n^2}{\left(n_1^2 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)^2} \Phi^2 \quad (5-7)$$

$$\text{设 } \sigma = \frac{\left(n_2^2 + 1 - n_1^2 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right) 4n^2}{\left(n_1^2 - \frac{n_2^2}{n_1^2}\right)^2} \quad (5-8)$$

$$\text{则式(5-7)得 } \nu = \sigma \Phi^2 \quad (5-9)$$

ν 与 $\sigma \Phi^2$ 同号, σ 的正负号表示极值为极大还是极小值

由式(5-9)可把膜厚的误差表示为相对值, 表达式为:

$$P_R = \frac{\Phi}{\frac{\pi}{2}} = \frac{|\nu|^{\frac{1}{2}}}{\frac{\pi}{2} |\sigma|^{\frac{1}{2}}} \quad (5-10)$$

由此可以得出结论: 式(5-10)可作为在监控片上镀单层薄膜时, 判定膜层厚度偏差大小的依据。

通常传统极值法判定极值反射率不可能优于极值的 1%, 在许多情况下, 特别是系统的信噪比较小的情况下, ν 值远大于 1%。

我们研制的中心波长为 $15.1\mu\text{m}$ 的卫星用红外带通滤光片, 其薄膜镀制材料分别为 ZnSe(硒化锌)与 PbTe(碲化铅), 在原有的监控条件下, 采用“分离法”镀制时, ZnSe(硒化锌)材料膜厚误差 P_R 从 4.8% 到 2.8%, PbTe(碲化铅)材料的膜厚误差 P_R 从 7.0% 到 4.9%; 而在改进后的监控条件下, 采用同样方法镀制时, ZnSe(硒化锌)材料膜厚误差 P_R 提高到了 2.8% ~ 2%, PbTe(碲化铅)材料的膜厚误差提高到了 4.9% ~ 2%。

6 结 论

通过研究改进中远红外光学薄膜膜层厚度监控装置, 大幅度提高了现有的红外滤光片研制工艺水平, 所研制出的红外带通滤光片的性能也有了很大的提高, 如滤光片中心波长处通带的透射率就从平均 60% 提高到平均 70% 左右(如图 3), 而美国军用标准规定, 当该透射率为平均 60% 时, 就达到卫星使用标准。此外, 通带宽度也得到了提高, 中心波长处通带的波形也保持较好的完整性。

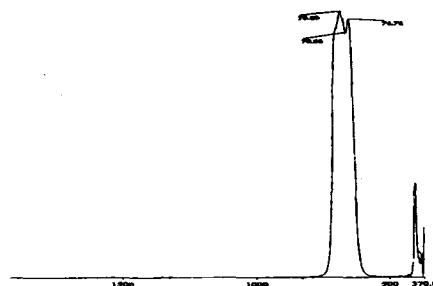


图 3 改进后研制出的滤光片成品

参考文献

- 1 薄膜光学. 机械工业出版社
- 2 红外光学系统. 国防工业出版社
- 3 工程光学. 机械工业出版社