

可见与近红外增透膜的设计和制备

张家斌,付秀华,贺才美
(长春理工大学,吉林 长春 130022)

摘要:为满足大气辐射系统中光学元件的使用要求,即可见与近红外波段高透过,根据双有效界面法设计原理配合膜系软件设计膜系,采用离子辅助沉积,电子束真空镀膜的方法,通过对工艺参数的调整和监控方法的改进,制备400~1200 nm宽带增透膜。所镀膜层在垂直入射时,400~1200 nm波段平均反射率小于1%。同时对膜层牢固性进行了测试,满足大气辐射系统的使用要求。

关键词:光学薄膜;大气辐射系统;宽带增透膜;离子辅助

中图分类号: O484.1 **文献标识码:** A

Design and fabrication of visible and infrared band broadband AR coating

ZHANG Jia-bin, FU Xiu-hua, HE Cai-mei
(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to meet the optical instruments' operating requirements of atmospheric radiation systems, namely, it must be high transmittance during visible and near-infrared band, we adopt electronic beaming vacuum depositing method with the aid of ion assistant deposition systems. The structure is designed by TFC software with double efficiency interface theory. Through optimizing technical parameters and improving the monitor method, we deposit the film on the substrate. In condition of vertical incidence, the average reflectivity below 1% through 400~1200nm wavelength. In addition, the coating have successfully passed environmental tests, it can completely meet the demands of atmospheric radiation systems.

Key words: optical thin film; atmospheric radiation systems; broadband AR coating; ion assistant deposition(IAD)

1 引言

增透膜,也称减反射膜,用于减少光学元件表面的反射,增加工作波段内光线的透过率。日常生活中的一些光学元件都通过镀增透膜来提高光能量,增加光线透过率,如照相机、摄像机、显微镜。而现代综合性光学仪器往往一机多用,光学系统的工作波段可能要覆盖可见、微光、红外,这样的光学系统比较复杂,光学零件很多,光能的损失也很大,这样就需要工作光谱范围很宽的宽带增透膜来改善光学元件成像质量,尤其是在微光系统、夜视系统、CCD和大气辐射系统中。

本文针对大气辐射系统中光学元件的使用要

求,选取 TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , MgF_2 四种镀膜材料,通过改进工艺参数,优化监控方法,制备了400~1200 nm宽带增透膜,最后给出了实测光谱曲线和牢固度测试结果。

2 双有效界面法原理

当光线从折射率为 n_0 的介质入射到折射率为 n_1 介质时,在两种介质的分界面上就会产生光的反射。如果介质没有吸收,分界面是一光学表面,光线垂直入射,则反射率 R 为:

作者简介:张家斌(1981-),男,硕士研究生,研究方向为光学薄膜技术。E-mail:jiabin_1320622@sina.com

收稿日期:2008-11-28

$$R = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2$$

如果不考虑吸收,透射率为 $T = 1 - R$ 。

增透膜的原理就是消除镜片界面的反射。

对于一个单层介质薄膜,当光进入这层介质膜时,要在膜层内多次反射,并且每次反射都有一部分波透过相应的界面,对各部分求和就可得到反射波透射波的和振幅。

经过求和,和振幅反射系数为:

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

和振幅透射系数为:

$$t = t_1^+ t_2^+ e^{-i\delta_1} + t_1^+ r_2^+ r_1^- t_2^+ e^{-3i\delta_1} + \dots = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta_1}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta_1}} \quad (2)$$

这样,单层膜的两个界面就可以用一个等效界面来表示。它的振幅反射系数和振幅透射系数由式(1)和式(2)得出。

而对于多层膜的情况,我们把选定的膜层从膜系中分离出来,整个膜系组合就可以用两个有效界面表示。只考虑单层膜中的多次反射,则对多层膜的特性就可以进行分析,只要求出选定膜层两侧子膜系的反射系数和透射系数即可。

假设膜系两侧的介质的导纳相同,则透射率 T 为:

$$T = |t|^2 = \frac{|t_1^+ t_2^+|^2}{|1 - r_1^- r_2^+ e^{-2i\delta}|^2}$$

$$r^- = |t_1^-| e^{i\varphi_1}, r_2^+ = |r_2^+| e^{i\varphi_2}$$

则:

$$T = \frac{|t_1^+|^2 |t_2^+|^2}{1 + |r_1^-|^2 |r_2^+|^2 - 2 |r_1^-| |r_2^+| \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)}$$

若已知 $|t_1^+|$, $|t_2^+|$, $|r_1^-|$, $|r_2^+|$ 以及 $\varphi_1, \varphi_2, \delta$, 就可完全确定多层膜的透射率。透射率表达式也可以写成如下形式:

$$T = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2}$$

$$1 + \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \cdot \sin^2 \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)$$

显然,即使膜系两侧的介质有不同的导纳,上式也成立。

令:

$$\bar{R} = \sqrt{R_1 R_2}, T_0 = \frac{T_1 T_2}{(1 - \bar{R})^2}$$

$$F = \frac{4\bar{R}}{(1 - \bar{R})^2}, \theta = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)$$

则:

$$T = \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \theta}$$

当 $T = 1$ 时, $R = 0$ 。式中的 T_0 和 F 只取决于分隔出的上下两子膜系的反射率,而 $\sin^2 \theta$ 只取决于两分膜系的反射相移及中间层的膜层厚度。只有当 $T_0 \approx 1$ 和 $\sin^2 \theta \approx 0$ 时,整个膜系在该波长处的透过率接近 1。

3 膜系设计

膜系设计主要考虑以下两点:①由于实际膜层制备过程中膜层厚度存在控制误差,为了减少误差的累积,总层数不能太多。②尽量使膜系中各层厚度保持均匀。过厚的膜层会产生较大的应力,影响牢固度,而过薄的膜层则不容易监控,导致膜层厚度误差很大,影响整个光谱曲线。常用的三层增透膜膜系为 GIM 2H LIA,其光谱曲线为 W 形,透射光谱范围比较窄,无法满足使用要求。依据三层增透膜系,采用双有效界面法,逐渐增加膜层层数和膜层的总厚度,并使用 TFC 膜系设计软件针法优化辅助设计^[1]。首先考虑只用 TiO_2 和 SiO_2 两种材料设计膜系,经过优化,其膜系为:Sub|1.5237L 0.0868H 0.6891L 0.3404H 0.3608L 0.5360H 0.0910L 2.0465H 0.2454L 0.3873H 1.1436L|Air,光谱曲线如图 1 所示。

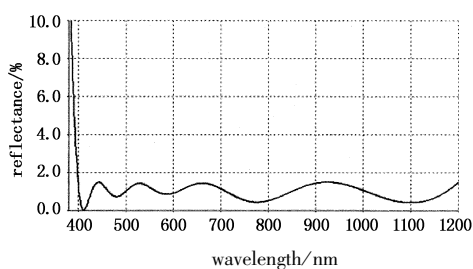
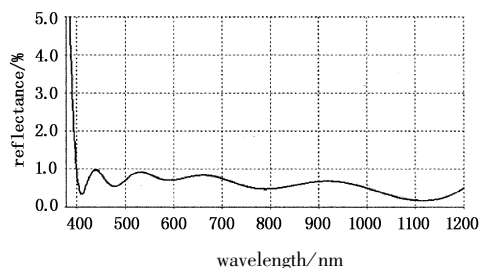


图1 采用 TiO_2 和 SiO_2 两种材料设计的增透膜光谱曲线

由图 1 可以看出只使用 TiO_2 和 SiO_2 两种材料设计出的非规整膜系,其光谱曲线的平均反射率大于 1%,而且透射带较窄,达不到设计要求。经过分析及膜系设计软件模拟,在原膜系基础上,加入 Al_2O_3 和 MgF_2 两种材料,经过多次优化,理论设计曲线,如图 2 所示。

图2 TiO₂, SiO₂, Al₂O₃, MgF₂ 四种镀膜

材料设计的增透膜光谱曲线

从理论曲线可以看出所设计膜系符合要求,并且膜系中各膜层厚度比较均匀。

4 镀膜实验

薄膜制备工作是在国产700型真空镀膜机上完成的,该镀膜机配有惠州奥普康电子枪,此电子枪蒸发速率稳定,可以与IC/5晶控系统配合自动镀膜。镜片用乙醇乙醚混合溶液擦拭干净,装入夹具,放在基片架上,抽真空。当真空度达到所需要的压力时,对镀膜件加烘烤,烘烤温度为240℃。当真空度为 3×10^{-3} Pa时,冲入氧气,使真空室内压强保持在 1×10^{-2} Pa左右,打开考夫曼离子源轰击基底10min,开始蒸镀。

膜厚控制采用的是光控和晶控结合的方法,经过计算,一些厚度合适的膜层采用换监控波长光控的方法控制,来减少监控误差,其他非周期膜层采用晶控。在TiO₂镀制过程中,充氧至压强 1.2×10^{-2} Pa,蒸发速率为3 Å/s,并采用离子源辅助沉积。

5 测试结果及分析

采用日本岛津UV-3150分光光度计进行测试,光谱曲线如图3所示。

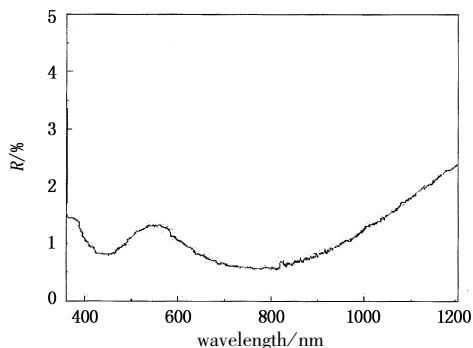


图3 修正之前曲线

由图3可以看出,整个光谱曲线反射率偏高,光谱的增透带宽也没有达到设计要求。经分析实验过程中膜厚存在误差以及TiO₂吸收偏高。将实测数

据及设计膜系输入OptiRE软件,重新修正IC/5中的Tooling值^[2]。为解决TiO₂吸收大的问题,调整了工艺参数,把烘烤温度提高到320℃,同时将TiO₂蒸发速率调整为2 Å/s,使Ti原子可以和氧气充分反应,减少吸收,并选择合适的离子源功率。经过多次试验,得到如图4所示光谱曲线,接近理想的设计曲线。

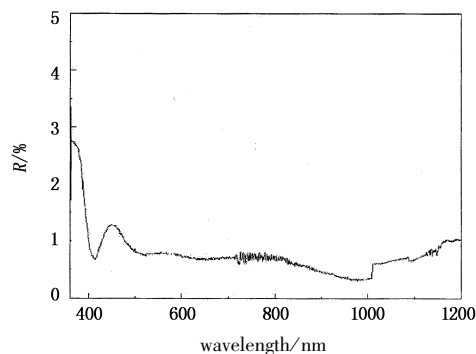


图4 最终测试曲线

6 膜层性能测试

为了保证光学元件的可靠性,根据使用要求对样品进行了环境试验:

(1) 高低温测试:将样品放入低温箱,由室温降到-50℃,保持2h;将样品放入高温箱,由室温升到70℃,保持2h,膜层未有明显变化。

(2) 湿热测试:在湿度为95%,温度为50℃条件下,放置12h,膜层未有明显变化。

(3) 耐盐雾性能测试:无包装的情况下,在浓度为4.9%~5.1%。pH值为6.5~7.2(35℃)的盐雾中承受连续喷雾48h,膜层表面无明显变化。

7 结论

通过调整工艺参数如烘烤温度、膜料蒸发速率、离子源功率和优化监控方式的方法,重点解决了增透带宽较窄及反射率过高的问题,基本满足大气辐射系统元件的设计要求。但是最终测试曲线与理想的设计曲线还有一定差距,膜厚的控制有一定误差,TiO₂也存在一定吸收。改进监控方法,减小TiO₂吸收及减少整个膜层平均反射率及增大增透带的带宽是今后研究和改进的方向。

参考文献:

- [1] 林永昌,顾永林,张诚,等. 针法与初始膜系设计[J]. 光学学报,1999,10,(19):1433-1436.
- [2] 缪毅强,毛书正,罗琦琨. 宽带增透反射光谱的理论与实测偏差的修正[J]. 红外与毫米波学报,2001,12(20):429-432.