

doi:10.3788/gzxb20174611.1123001

基于太阳模拟器阶梯式补偿滤光片的研究

付秀华, 杨金也, 刘冬梅, 张静, 郭凯

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 太阳模拟器是利用人工光源模拟太阳光辐照的设备, 滤光片作为太阳模拟器中的重要元件, 对其光谱精度要求也越来越高. 本文通过建立数学模型, 引入新的评价函数, 设计了 0.4~1.1 μm 波段五个不同分光要求的阶梯式补偿滤光膜. 并在薄膜制备过程中, 应用最小二乘法原理对实验数据进行拟合, 找到了残余蒸镀量与膜层厚度之间的关系, 解决了残余蒸镀对薄膜的光谱影响, 最终制备出的薄膜符合使用要求.

关键词: 阶梯式; 太阳模拟器; 评价函数; 滤光片; 残余蒸镀

中图分类号: O484

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)11-1123001-5

Research on Ladder-type Compensation Filter Based on Solar Simulator

FU Xiu-hua, YANG Jin-ye, LIU Dong-mei, ZHANG Jing, GUO Kai

(School of Electr-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The solar simulator is a device that uses artificial light to simulate sunlight, as an important component of the solar simulator, the accuracy of the filter spectral requirements are getting higher and higher. In this paper, a step compensation filter with five different spectral requirements in the 0.4~1.1 μm band is designed by establishing a mathematical model and introducing a new evaluation function. In the process of film preparation, the least squares method was used to fit the experimental data, and the relationship between the residual deposition amount and the thickness of the film was found, which solves the spectral effect of the residual deposition on the film, and the film finally meets the requirements.

Key words: Ladder-type; Solar simulator; Merit function; Optical filter; Residual deposition amount

OCIS Codes: 230.0240; 240.0230; 310.0310

0 引言

太阳模拟器滤光片的主要作用是对光源光谱进行修正补偿, 使出射光的光谱曲线更加接近太阳光谱, 实现对太阳光谱的精确模拟^[1]. 2014 年, 意大利 Perugia 大学的 Andrea Presciutti 等人利用在玻璃基底上生长有机分子/聚合物的结构取代系统中的滤光片, 用以降低太阳模拟器滤光系统成本^[2]. 2015 年, 中科院长春精密机械与物理研究所的高雁、刘洪波等研制了一种实用型三谱段太阳模拟器, 对灯阵出射光谱的不同波段进行修正^[3].

短弧氙灯、卤素灯、金属卤素灯、钨丝灯、碳弧灯、LED 灯等均可作为太阳模拟器的光源, 它们各有优劣^[4]. 但光源发出的光与太阳光的光谱能量分布均存在较大差异, 因此需要研制一种滤光片, 对光源出射光谱进行修正补偿.

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(No.20140203002GX)资助

第一作者: 付秀华(1963—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学薄膜和现代光学加工技术. Email: gopticas@126.com

通讯作者: 杨金也(1984—), 男, 博士, 主要研究方向为现代光学薄膜技术. Email: yjyoptical@163.com

收稿日期: 2017-05-10; 录用日期: 2017-07-28

<http://www.photon.ac.cn>

如何更精确地模拟太阳光谱,已成为该领域的研究重点.传统太阳模拟器滤光片在可见光波段只有一个优化目标,难以对太阳光谱进行精确模拟.本文对比 AM1.5 太阳光谱,将可见光分为三个波段进行优化,使其更接近太阳光谱.

1 滤光膜参数的确定

用短弧氙灯组成的灯阵作为光源,将灯阵的出射辐照度与 AM1.5(Air Mass)太阳光谱辐照度进行对比,如图 1.

对存在差异的部分通过公式进行优化拟合,获得阶梯式补偿滤光片的光谱要求^[5],其技术参数为

$$T_0(\lambda) = \begin{cases} 0.8 & (0.4 \mu\text{m} \leq \lambda < 0.5 \mu\text{m}) \\ 0.9 & (0.5 \mu\text{m} \leq \lambda < 0.6 \mu\text{m}) \\ 1.0 & (0.7 \mu\text{m} \leq \lambda < 0.75 \mu\text{m}) \\ -3489\lambda^4 + 11899\lambda^3 - 15153\lambda^2 + 8538\lambda - 1795 & (0.75 \mu\text{m} \leq \lambda < 0.95 \mu\text{m}) \\ 0.9 & (0.95 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.1 \mu\text{m}) \end{cases} \quad (1)$$

2 基底与材料的选择

由于太阳模拟器的光源是短弧氙灯组成的灯阵,因此在选择基底材料与薄膜材料时,需要考虑其热膨胀系数以及在全光谱具有高透射,材料的耐高温性同样不可或缺.

2.1 基底的选择

常用的太阳模拟器滤光片基底材料为石英,石英又分为 JGS1、JGS2 以及 JGS3 三种^[6].其中 JGS3 石英具有耐高温、热膨胀系数小等优点,其透明区为 $0.24 \sim 3.6 \mu\text{m}$,并且从紫外区域到近红外区域都有较高的透过率,因此选择 JGS3 石英作为滤光片的基底材料.

2.2 薄膜材料的选择

常用的太阳模拟器滤光膜高折射率材料主要有氧化铪、氧化锆和氧化钛等.其中氧化铪折射率为 2.15,但氧化铪进行蒸发制备时为固态蒸镀,制备大口径基底时成膜均匀性不佳;氧化锆折射率约为 1.97,其散射量大,薄膜在空气中易吸收水分^[7],使其透射率与反射率产生变化,影响光谱的稳定性;氧化钛在 $0.4 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 波段易出现吸收现象,会降低薄膜透过率. $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ 混合材料具有液态蒸发,折射率稳定、成膜质量好等优点,其服从典型的柯西色散关系,混合后可弥补各自材料的不足,且按一定的比例混合,折射率可达到 2.25.因此,选择 $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ 混合材料作为高折射率材料.

SiO_2 折射率为 1.46,与 $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ 混合材料应力匹配良好,蒸发温度在 $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,透明区为 $0.2 \sim 9 \mu\text{m}$,并且散射吸收小,具备成膜质量高、耐磨损抗腐蚀等优点,因此选择 SiO_2 作为低折射率材料.

3 多光谱补偿滤光膜的设计

选定基底材料后,根据技术要求,在基底前表面设计多光谱补偿滤光膜.为了在可见及近红外区域获得较高的透过率,减少能量损失,在基底后表面设计宽带减反射膜.

3.1 前表面膜系设计

双有效界面法又称史密斯法,其设计思路是使选定的膜层从膜系中分离出来,整体膜系的组合可用两个选定的有效界面来代替.只考虑选定膜层中的多束光干涉,那么即可获得多层膜的光学特性,从而得出一种设计膜系的方法^[8].

$$T = \frac{(1 - R_a)(1 - R_b)}{(1 - \sqrt{R_a R_b})^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{4\sqrt{R_a R_b}}{(1 - \sqrt{R_a R_b})^2} \sin^2 \frac{1}{2}(\varphi_a + \varphi_b - 2\delta)} \quad (2)$$

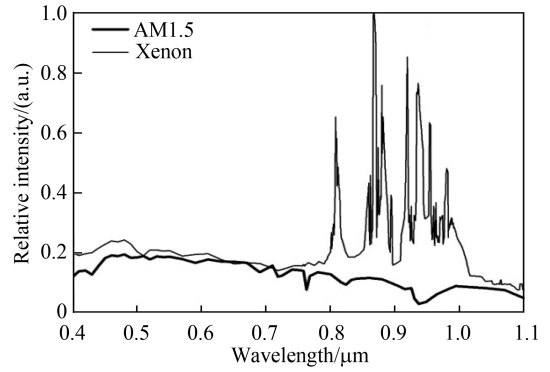


图 1 短弧氙灯灯阵与 AM1.5 太阳光谱辐照度对比
Fig.1 Comparison of short-arc xenon lamp array and AM1.5 solar spectral irradiance

$$\text{令 } \bar{R} = \sqrt{R_a R_b}, T_0 = \frac{(1-R_a)(1-R_b)}{(1-\bar{R})^2} = 1, F = \frac{4\bar{R}}{(1-\bar{R})^2}, \theta = \frac{1}{2}(\varphi_a + \varphi_b - 2\delta), \text{ 则有}$$

$$T = \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \theta} \quad (3)$$

式(3)表明, $T_0(\lambda)$ 和 $F(\lambda)$ 只取决于两个子膜系的反射率 R_a 与 R_b , $\sin^2 \theta$ 只取决于两个子膜系的反射相移以及选定层膜层的位相厚度。

对于各相邻波段技术指标不同、要求复杂的滤光膜,采用常规的评价函数难以设计出满足设计要求的滤光膜,因而考虑引入新的评价函数。即在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段范围内, j 层膜的能量透过率 $T_j(\lambda)$ 与给定理想能量透过率 $T_0(\lambda)$ 的差值平方为最小值时,每层膜的光学厚度为理想厚度,将评价函数定义为

$$f = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega_j(\lambda) \cdot [T_j(\lambda) - T_0(\lambda)]^2 d\lambda \quad (4)$$

式中 $T_j(\lambda)$ 表示目标函数, $T_0(\lambda)$ 表示目标值, $\omega_j(\lambda) > 0$ 为权重因子。从式(1)可以看出,该滤光膜的目标透过率函数是一个较复杂分段函数,根据系统的能量分布特点,各波长处权重相同,即有 $\omega_j(\lambda) \equiv C$ (常数),式(2)可简化为

$$f = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [T_j(\lambda) - T_0(\lambda)]^2 d\lambda \quad (5)$$

根据理论推导,将式(1)、式(5)导入 Essential Macleod 软件遗传算法模块中,将膜系的层数 j 设置为变量的个数,使程序根据目标值进行自动优化,通过不断迭代计算,降低膜系理论值与目标值之间的差异,从而寻求最优解。

应用软件对膜系前表面多波段分光进行设计,得到膜系 Sub1.23H0.53L1.31H0.98L0.86H1.23L1.04H1.01L0.94H1.28L0.99H0.76L0.70H1.84L0.83H0.98L2.24H0.89L0.73H1.27L1.06H0.91L1.02H1.19L1.03H0.48L1.93H1.25L0.27H | Air。其中 Sub 为 JGS3 基底,符号 H 和 L 分别代表 $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ 混合材料和 SiO_2 的 $\lambda/4$ 光学厚度, Air 表示空气,设计结果如图 2 所示。

3.2 后表面膜系设计

根据双有效界面法理论,利用软件对膜系进行优化,设计膜系 Sub | 0.62H1.11L0.74H0.51L4.26H0.55L0.62H3.99L0.65H0.45L2.92H0.34L0.74H1.83L | Air,设计结果如图 3,前后表面设计曲线进行匹配叠加,获得设计结果如图 4。

4 薄膜制备

采用离子辅助沉积技术对薄膜进行制备,全程利用石英晶体膜厚控制仪监测薄膜物理厚度。采用正交实验法,经过多次实验,当束流调节到 160 mA,蒸发真空度控制在 1.0×10^{-2} Pa 时,选定 TiO_2 与 ZrO_2 的混合比为 2 : 1,此时在该波段的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 混合材料折射率可稳定达到 2.25,这与文献 [9] 的结论一致。 $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$ 混合材料与 SiO_2 均为氧化物,因此在制备过程中需充入氧气,具体制备工

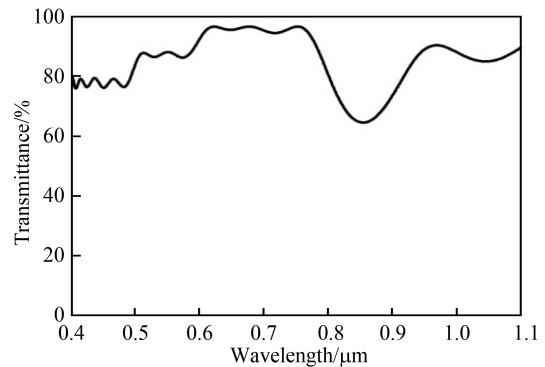


图 2 前表面多光谱补偿滤光膜设计曲线
Fig.2 Design curve for multi-spectral compensation filter on the front surface

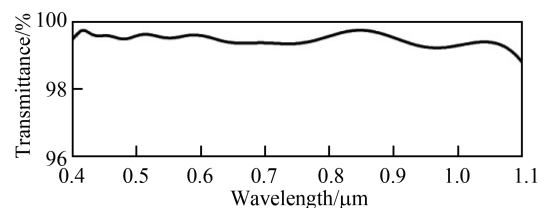


图 3 宽带减反膜设计曲线
Fig.3 Broadband anti-reflective design curve

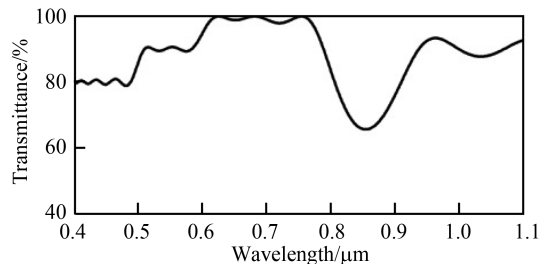


图 4 理论双面透过率曲线
Fig. 4 Double-sided transmission spectrum curve of theoretical design

艺参数如表 1 所示.

表 1 工艺参数表
Table 1 Technological parameters

Material	Deposition rate/(nm · s ⁻¹)	Substrate temperature/°C	Vacuum/Pa	Flow rate of O ₂ /sccm
TiO ₂ /ZrO ₂	0.3	290	1.0 × 10 ⁻²	12
SiO ₂	0.7		1.5 × 10 ⁻²	20

5 测试结果及分析

5.1 光谱测试

前表面薄膜制备完成后,使用日本岛津 UV-3150 分光光度计对基片进行测试,光谱曲线见图 5.

5.2 测试结果分析

对比图 3 和图 5 可知,0.4~0.6 μm 处存在明显差异,分析原因是在制备过程中存在残余蒸镀,从而使测试光谱曲线与设计存在较大差异.

传统解决残余蒸镀的方法是在实验过程中记录下每层残余蒸镀量,再通过减少程序中每层膜相对应的残余蒸镀厚度,达到控制残余蒸镀的目的^[10].这种方法只能单纯针对设计的某一个膜系使用,如果更换一种设计,就需要重新进行多次实验来确定各层的残余蒸镀量,不具备普适性.

实验采用石英晶体监控法监控薄膜物理厚度,该方法是通过监测 AT 切割石英晶体的振动频率的改变量来判断膜层厚度的方法,其原理为

$$\Delta f = -\frac{\rho_M}{\rho_Q} \cdot \frac{f^2}{N} \Delta d_M \quad (6)$$

式中,Δf 表示震动频率的变化量,ρ_M 表示膜层密度,ρ_Q 代表石英密度,Δd_M 表示厚度改变量,f 表示石英晶体基频,N 表示石英晶体的频率常数,那么当材料确定的情况下,− $\frac{\rho_M}{\rho_Q} \cdot \frac{f^2}{N}$ 通常为常数.

对实验所得数据进行统计和分析发现,对于单一材料而言,其残余蒸镀量都是随着膜层的厚度增加而有增大的趋势,该现象与石英晶体的振动频率随着厚度的增加而减小有关,因此可通过建立数学模型来确定残余蒸镀与膜层总厚度之间的关系.

将 TiO₂/ZrO₂ 混合材料的各残余蒸镀量与总厚度导入 Matlab 中,根据最小二乘法原理,调用 polyfit(x, y, n) 函数进行多项式拟合,其中 n 是多项式的最高次数.经过多次尝试,发现当 n 取值为 2 时,拟合的曲线与实验结果具有较好的一致性,拟合结果如图 6 所示,残余蒸镀量 R_{tH} 与膜层厚度 x 之间的关系表达式为

$$R_{tH} = 0.3130x^2 + 1.0665x + 0.4767.$$

同理,可拟合出 SiO₂ 的残余蒸镀量 R_{tL} 与膜层厚度 x 的拟合曲线如图 7 所示,关系表达式为

$$R_{tL} = 0.0516x^2 + 0.1010x + 0.1884.$$

通过此方法,可以得到该设备的 TiO₂/ZrO₂ 混合材料与 SiO₂ 在任意厚度的对应残余蒸镀量.

因为前后表面薄膜制备过程中均存在残余蒸镀影响光谱问题,所以将此方法应用在后表面制备过程中,所

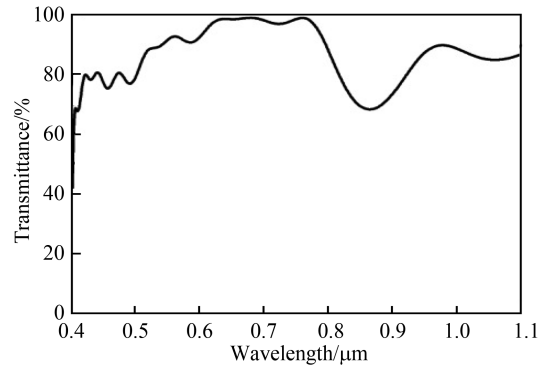


图 5 前表面光谱测试曲线
Fig.5 Spectral test curve of front surface

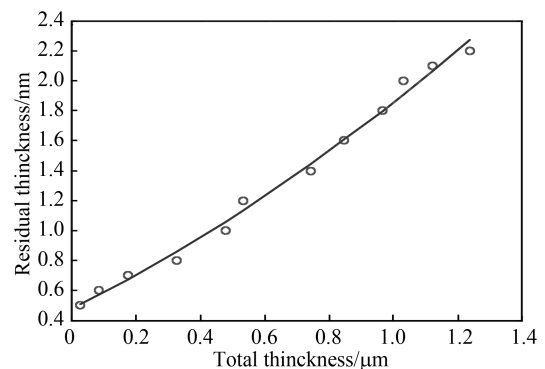


图 6 TiO₂/ZrO₂ 残余蒸镀与制备厚度的关系
Fig.6 Relationship between residual deposition amount of TiO₂/ZrO₂ and thickness of preparation

得到的光谱曲线符合要求,从而验证了模型的可行性,实际制备残余蒸镀量与图6及图7对应数据基本吻合。工艺优化后最终制备出的薄膜测试曲线与设计曲线对比如图8所示。

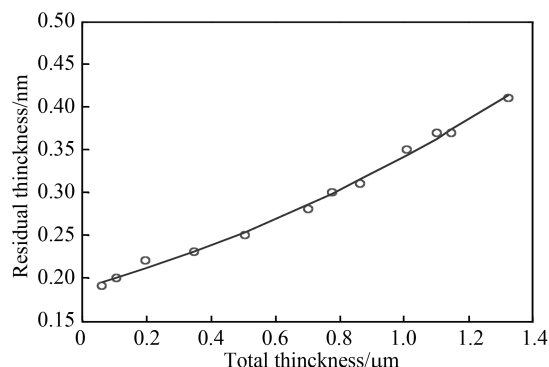


图7 SiO₂ 残余蒸镀与制备厚度的关系

Fig.7 Relationship between residual deposition amount of SiO₂ and thickness of preparation

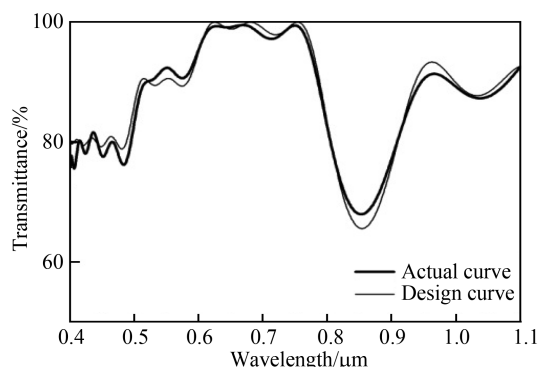


图8 实测曲线与设计曲线对比图

Fig.8 Comparison of the actual curve and the design curve

5.3 环境测试

将滤光片放入电热恒温干燥箱 300 °C 加热 1 h 后取出进行光谱测试,滤光片光谱无明显变化。

6 结论

本文根据光学薄膜基础理论和太阳光模拟器滤波片要求,通过建立数学模型、引入评价函数等方法进行膜系设计,使用 TiO₂/ZrO₂ 混合材料与 SiO₂ 制备了 0.4~1.1 μm 阶梯型补偿滤光膜,通过引入评价函数,解决了设计过程中存在的问题,又应用最小二乘法原理对制备厚度及残余蒸镀量进行拟合,找到了残余蒸镀量与膜层厚度之间的关系表达式,在工艺方面解决了残余蒸镀对薄膜的光谱影响,设计并制备出的太阳模拟器多光谱补偿滤光片满足使用要求。设计光谱曲线与实际制备出滤光片的光谱曲线仍存在差异,分析原因是由于工艺上存在一些厚度及光学常数误差,进一步优化工艺参数,获得更高精度的太阳模拟器滤光片,将是今后工作研究的重点。

参考文献

- [1] 刘石. 高准确度准直式太阳模拟器及其关键技术研究[D]. 长春理工大学,2014.
- [2] PRESCIUTTIA, ASDRUBALI F, ANDREA, *et al.* Sun Simulators: development of an innovative low cost film filter [J]. *Sustainability*, 2014, **6**(10): 6830-6846.
- [3] GAO Yan, LIU hong-bo, WANG li, *et al.* Design and manufacture of a large-area collimation solar simulator[J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(6): 1004-1012.
高雁,刘洪波,王丽,等. 实用型三谱段太阳模拟器的设计与研制[J]. 中国光学,2015,**8**(6):1004-1012.
- [4] FRYC I, BROWN S W, OHNO Y. Spectral matching with an LED-based spectrally Tunable light source[C]. Fifth international Conference on Solid state Lighting. Bellingham: SPIE, 2005: 59411-1-9.
- [5] 顾浩楠. 太阳模拟器 AM1.5 滤光片的研制[D]. 长春理工大学,2012.
- [6] MENG Jia-yi, FU Xiu-hua, WANG di. Fabrication of spectral correction filter in solar simulator[J]. *Photoelectricity Engineering*, 2010, **37**(2): 50-53.
孟嘉译,付秀华,王迪. 太阳模拟器中光谱修正滤光片的研制[J]. 光电工程,2010,**37**(2):50-53.
- [7] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology[M]. New York: academic, 1982.
- [8] 唐进发,顾培夫,刘旭,等. 现代光学薄膜技术[M]. 浙江:浙江大学出版社,2006:40-42.
- [9] XU jun-qi, LI rong, SU Jun-hong, *et al.* Growth of TiO₂/ZrO₂ composite films and its refractive index[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2010, **30**(4): 420-424.
徐均琪,李荣,苏俊宏,等. TiO₂/ZrO₂ 复合薄膜的制备及工艺参数对薄膜折射率的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2010,**30**(4):420-424.
- [10] LIU Dong-mei, WANG Xiao-juan, FU Xiu-hua. Design and fabrication of near-infrared narrow-band filters with wide reject band.[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0131002.
刘冬梅,王小娟,付秀华,等. 近红外宽截止窄带滤光膜的研制[J]. 光子学报,2014,**43**(1):0131002.