

太阳模拟器 AM0 型滤光片及其稳定性研究

潘永强, 白涛, 杭凌侠

(西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710032)

摘要: 太阳模拟器作为航天科技卫星空间环境模拟和太阳能电池检测与标定的必要模拟设备, 越来越受到人们的关注。太阳模拟器滤光片作为模拟器的核心部件, 通过对模拟器光源滤光, 可以得到不同的太阳光谱辐照度。文中研究的 AM0 滤光片通过对氙灯光源滤光, 可以得到大气层表面的太阳光谱辐照度分布。根据标准 AM0 光谱辐照度曲线和标准氙灯辐照度曲线, 得到 AM0 滤光片透过率曲线。在此基础上对滤光片进行膜系设计和镀制, 得到了满足国标 A 类标准的 AM0 滤光片。对滤光片进行了紫外辐照实验和高温烘烤实验, 研究了其光学稳定性, 所镀制的滤光片光学稳定性优于目前使用的滤光片。

关键词: 太阳模拟器; AM0 滤光片; 光谱辐照度; 光谱匹配度; 稳定性

中图分类号: O484 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1306-05

Stability of air mass0 filter for solar simulator

Pan Yongqiang, Bai Tao, Hang Lingxia

(Shaanxi Province Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory, Xi'an Technological University,
Xi'an 710032, China)

Abstract: The solar simulator as a crucial equipment is used in simulating the space environment for satellites, testing and calibrating for solar cells. The air mass filter as the crucial component can filtrate the lamp for getting the proper solar spectrum. Through the air mass0 (AM0) filter the solar spectrum on the surface of aerosphere could be obtained. The transmittance of AM0 filter could be obtained through the standard AM0 spectrum and xenon lamp spectrum. Then, the design and fabrication of the filter was done. The filter gets the A level standard. At last, the filter was dealt with ultraviolet and high temperature for studying the optical stability. The results show the new filter is better than the traditional filter in optical stability.

Key words: solar simulator; AM0 filter; spectral irradiance; spectral match; stability

收稿日期: 2012-09-12; 修订日期: 2012-10-20

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研项目(12JS047); 陕西省教育厅专项科研计划项目(2013JK1108)

作者简介: 潘永强(1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光学薄膜工艺和光学检测方面的研究。

Email: pyq_867@163.com, pansir74@163.com

0 引言

太阳模拟技术的应用非常广泛,应用太阳模拟技术研制的大型太阳模拟器是卫星空间环境模拟的最主要设备。太阳模拟器的光源作为核心部件,应具备发光效率高、功率可调、亮度高、光谱与太阳光谱尽可能相近、发光稳定和寿命长等特性。氙灯具备以上特点,且氙灯发出的光是从近红外、可见光、紫外的连续光谱,在可见光谱范围内光谱能量分布较为均匀,其谱色与太阳谱色相近,所以采用氙灯模拟太阳光谱。尽管氙灯光谱分布接近于真实太阳光谱分布,但在近红外波段区域还是存在差异,主要表现为氙灯光源的光谱辐照度在近红外太强。因此需要使用特定的滤光片对氙灯进行滤光,达到实际应用的要求。根据实际需要的太阳光谱,可以制备得到AM1.5G滤光片、AM0滤光片等^[1-3]。

目前使用的滤光片在对氙灯滤光一定时间后,其透射光谱曲线会发生一定的短波漂移,即其光学稳定性不佳。由于氙灯在光谱能量分布上具有很强的连续紫外辐射和近红外光谱,并且其本身是一种大能量光源,所以认为造成滤光片光学稳定性较差的主要原因是,制备的滤光片在氙灯的辐照下,滤光片膜层中的粒子结构在紫外光的作用下发生变化,从而导致光学特性发生变化;另外高能量光源辐照在滤光片表面上时,温度的积累也在一定程度上影响到了滤光片的光学特性。因此,有必要研究新的太阳模拟器滤光片取代传统的滤光片。

文中研究的 AM0 滤光片应用于太阳模拟器时,可以模拟大气层外太阳光谱的分布。首先从标准的 AM0 太阳辐照度光谱曲线和标准的氙灯辐照度光谱曲线出发,得到太阳模拟器 AM0 型滤光片的透过率曲线,然后依据此透过率曲线,设计理想的滤光片对氙灯进行滤光。根据设计得到的膜系,进行 AM0 滤光片的镀制,使得所制备的滤光片达到该行业国标 A 类标准。最后,通过紫外辐照实验和高温烘烤实验,研究了镀制的滤光片在工作时的光学稳定性^[4-7]。

1 实验

1.1 AM0 滤光片的设计和镀制

通常,为了设计并镀制出一种膜系,必须知道该

膜系对光谱反射率或透射率的具体要求,为了得到太阳模拟器 AM0 型滤光片的透射率光谱曲线,将标准 AM0 光谱与标准氙灯光谱进行了对比,图 1 给出了两者相对光谱辐照度曲线。

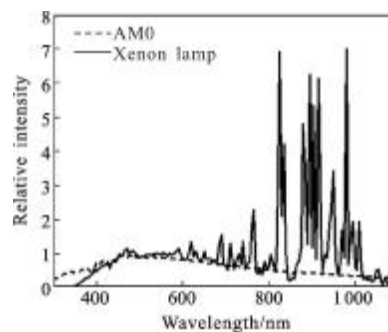


图 1 氙灯和 AM0 相对辐照度曲线

Fig.1 Relative intensity of Xenon and AM0

利用 AM0 的相对辐照度除以氙灯的相对辐照度,就可以得到所需 AM0 滤光片的光谱透过率曲线,如图 2 所示。

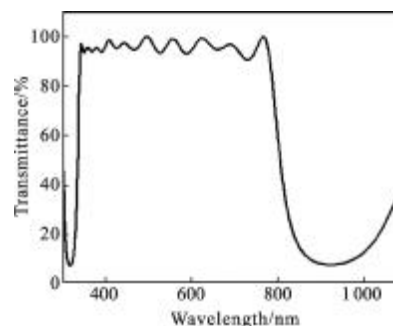


图 2 AM0 滤光片理论透过率曲线

Fig.2 Academic transmittance of AM0 filter

根据理论计算得到 AM0 滤光片透过率曲线,选用合适的膜料并利用膜系设计软件 TFC 进行滤光片的膜系设计。目前镀制太阳模拟器滤光片,主要使用 TiO_2 和 SiO_2 这两种膜料^[8]。存在的问题是滤光片经氙灯辐照一定时间后,透过率曲线明显发生变化,不能很好地对氙灯进行滤光。分析认为,制备的滤光片在氙灯的辐照下,滤光片膜层中的粒子结构在紫外光的作用下发生变化,从而导致光学特性发生变化;另外高能量光源辐照在滤光片表面上时,温度的积累也在一定程度上影响到了滤光片的光学特性。因此,选择合适的膜料用于滤光片的设计、镀制,确保所镀制的滤光片较目前使用的太阳模拟器滤光片光学稳定性好至关重要。为此,前期进行了单层薄膜

的光学稳定性研究实验, 研究发现单层膜 HfO_2 和 MgF_2 相对于单层膜 TiO_2 和 SiO_2 在高温烘烤和紫外光辐照后, 光学稳定性更好。最后选用膜料 HfO_2 和 MgF_2 用于膜系的设计和镀制^[9-12]。

由图 2 可知, 所设计的滤光片为短波通截止滤光片, 选用 $[0.5\text{LH}0.5\text{L}]^5$ 为基本膜系, 利用 TFC 进行膜系设计。设计得到的膜系为 $[0.5\text{L}(\text{HL})^5\text{H}0.5\text{L}]$, 所得滤光片透射率曲线如图 3 所示。

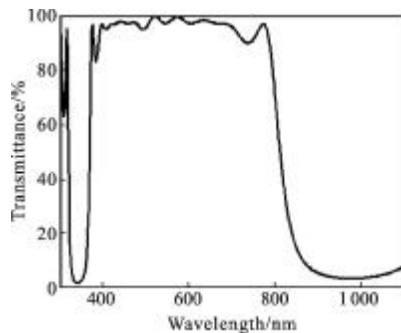


图 3 AM0 滤光片透过率曲线

Fig.3 Designed curve of AM0 filter

对设计得到的滤光片进行了光谱匹配度的计算, 通过计算滤光片的光谱匹配度可以确定所设计和镀制的滤光片是否达到使用要求。具体为, 计算氙灯经滤光片后不同波段的辐照度占总辐照度的比值与相应波段的国标中规定的标准值进行对比, 得到该波段的匹配度。计算结果表明, 所设计的滤光片达到国标中的 A 类标准, 满足使用要求。

根据设计得到的膜系, 进行滤光片的镀制。实验选用的仪器为南光 ZZS700-1/G 箱式镀膜机^[13], 基底材料选用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 、厚度为 2 mm 的 K9 玻璃, 利用光学监控法对膜厚进行监控。滤光片透过率检测使用的仪器是 U-3501 分光光度计, 测量的光谱范围为 $185\text{--}3\,200\text{ nm}$, 波长精度 U-V 区 $\leq \pm 0.2\text{ nm}$, NIR $\leq \pm 1.0\text{ nm}$ 。

1.2 滤光片的紫外辐照处理和高温烘烤处理

目前使用的 AM0 滤光片在使用一定时间后, 其透射率曲线会发生一定的变化, 影响对氙灯的滤光。分析认为, 这是由氙灯光源的特点决定的。氙灯紫外波段的能量较强, 辐照出的紫外光会改变滤光片中膜层的粒子结构, 从而影响到滤光片整体的光学特性。另外, 氙灯的高能量作用于滤光片时, 会有一些的热量积累, 使得膜层柱状结构中的水分子蒸发, 改变薄

膜的光学特性。因此, 需要选择合适的膜料并配合良好的镀制工艺, 使得所镀制的滤光片满足使用要求^[9]。

对镀制得到的 AM0 滤光片进行了紫外光辐照处理和高温烘烤处理。

选用 15 W 的紫外灯管对所得的滤光片进行了 10 h 的紫外辐照处理, 辐照距离 10 cm 。研究辐照前后透射率曲线的变化。并与选用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的 AM0 滤光片进行对比, 观察两者的变化程度。

对镀制的滤光片进行了高温烘烤处理, 在退火炉中 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温处理 30 min 后, 立即进行检测, 观察高温处理前后滤光片透射率曲线的变化。也与选用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的 AM0 滤光片进行对比, 观察两者的变化程度。

2 实验结果及分析

2.1 AM0 滤光片匹配度分析

实际镀制得到的 AM0 滤光片透射光谱如图 4 所示。

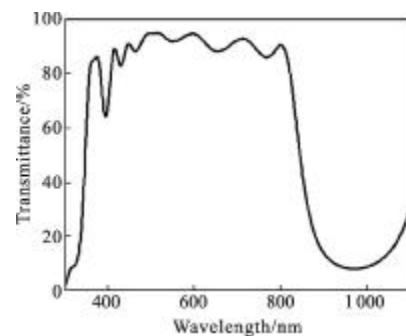


图 4 AM0 滤光片实际透射率光谱曲线

Fig.4 Practical transmittance curve of AM0 filter

对镀制的 AM0 滤光片进行了光谱匹配度分析, 得到的结果如表 1 所示。

表 1 AM0 滤光片匹配度分析

Tab.1 Spectral distribution of AM0 filter

λ/nm	Spectral match	Level standard
300-400	1.205 1	A
400-500	1.211 5	A
500-600	0.905 9	A
600-700	0.971 1	A
700-800	1.069 2	A
800-900	1.055 5	A
900-1100	0.973	A

通过表 1 可知,得到所镀制的滤光片在不同波段光谱匹配度均能达到国标 A 类标准,所制备的 AM0 滤光片满足使用要求。

2.2 紫外辐照稳定性对比

对满足使用要求的 AM0 滤光片首先进行了紫外辐照稳定性实验,研究其在 10 h 的紫外光辐照后滤光片透射率曲线的变化。实验结果如图 5 所示。

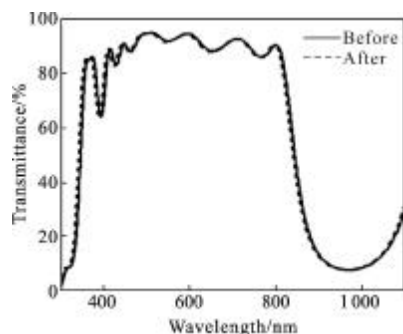


图 5 AM0 滤光片透过率曲线变化

Fig.5 Change of AM0 filter transmittance

而相应地对选用 TiO_2 和 SiO_2 两种膜料镀制的 AM0 滤光片,进行了相同条件的紫外辐照处理,处理前后折射率的变化量如图 6 所示。

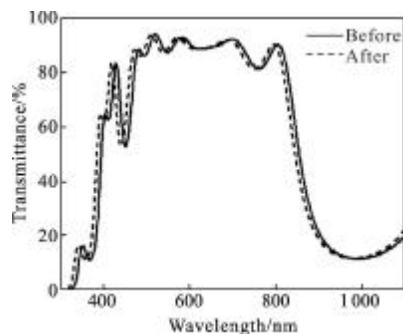


图 6 AM0 滤光片透过率曲线变化

Fig.6 Change of AM0 filter transmittance

研究发现使用 HfO_2 和 MgF_2 镀制的 AM0 滤光片,在经紫外光辐照后中心波长向短波方向漂移约为 5 nm,变化量明显小于使用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的滤光片,并且经计算其光谱匹配度在紫外光辐照后依旧能够达到 A 类标准,而使用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的 AM0 滤光片则不再能达到 A 类标准。分析认为,这是由于使用 HfO_2 和 MgF_2 镀制的滤光片,在紫外光的辐照下膜层粒子结构变化小,导致薄膜的光学特性变化也小,最终使得所镀制的滤光片的光谱透射率曲线变化不明显^[10]。

2.3 高温烘烤稳定性对比

薄膜的柱状结构使得镀制的薄膜在暴露于空气中时容易吸收空气中的水分子,导致薄膜折射率发生变化,影响到薄膜的光学特性。而随着使用环境的变化,柱状结构孔隙中的水分子会逐渐挥发,使得薄膜的光学特性再次发生变化。

文中的 AM0 滤光片在对氙灯光源进行滤光时,应考虑高能光源作用于薄膜时,温度的积累使得薄膜柱状结构中的水分子蒸发,影响到薄膜的光学特性。为此需要选用合适的薄膜材料、良好的镀制工艺,以期提高滤光片在高温烘烤下的光学稳定性。

对比了使用 HfO_2 和 MgF_2 镀制的 AM0 滤光片以及使用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的 AM0 滤光片,在高温烘烤后光学特性的变化。在镀制中,根据膜料的特点,选用常用的工艺镀制,得到较为理想的滤光片。

将使用 HfO_2 和 MgF_2 镀制的 AM0 滤光片在退火炉中恒温 $100\text{ }^\circ\text{C}$,经 30 min 后,立刻取出检测,滤光片透过率曲线变化如图 7 所示。

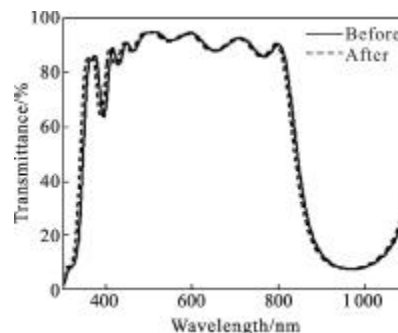


图 7 AM0 滤光片高温处理稳定性变化

Fig.7 Change of transmittance curve after heat treatment

而使用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的 AM0 滤光片在经相同条件处理后,滤光片透过率曲线变化如图 8 所示。

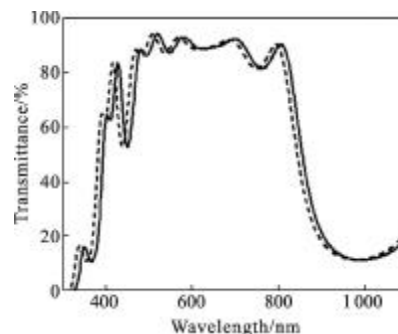


图 8 AM0 滤光片高温处理稳定性变化

Fig.8 Change of transmittance curve after heat treatment

研究发现,经相同条件的高温处理后,使用 HfO_2 和 MgF_2 镀制的滤光片,光学稳定性较好,透过率曲线没有发生明显的变化。说明使用这两种膜料,在常用工艺下镀制的滤光片膜层结构较好,柱状结构的致密性优于使用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的 AM0 滤光片中膜层柱状结构的致密性,因此水分子的吸收和挥发对滤光片光学特性不会产生明显的影响。另外,虽然 MgF_2 薄膜一般会呈现出较大的张应力,但是,由于在整个膜系中 MgF_2 和 HfO_2 是交替沉积的,可以通过工艺参数来适当控制薄膜的应力。因此,从实际镀膜的膜系情况来看,所镀制的 AM0 滤光片在使用中并未出现由于应力过大而引起的膜层脱落等现象。

3 结论

文中主要进行了 AM0 滤光片的设计和镀制,并通过实验对比了使用 HfO_2 和 MgF_2 镀制的滤光片与使用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的滤光片的光学稳定性。制备得到的 AM0 滤光片经检测达到国标中规定的 A 类标准,满足使用要求。另外,选用 HfO_2 和 MgF_2 镀制的 AM0 滤光片在紫外辐照后和高温烘烤后光学稳定性相对于使用 TiO_2 和 SiO_2 镀制的 AM0 滤光片要好。

参考文献:

- [1] Chen Wenzhi, Jiang Lulin, Jiang Li, et al. Experimental research of spectral design of solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222002(1)-0222002(6). (in Chinese)
陈文志, 蒋绿林, 姜黎, 等. 太阳模拟器的光谱设计实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0222002(1)-0222002(6).
- [2] Wang Zhiming, Gong Zhenbang, Wei Guangpu, et al. Solar simulation technique for solar cell measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 1542-1547. (in Chinese)
王志明, 龚振邦, 魏光谱, 等. 用于太阳电池测试的太阳模拟技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 1542-1547.
- [3] Peng Xiaojing, Xu Lin, Guo Ze. The spectral calibration of the class A solar simulator[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008, 29(11): 1324-1327. (in Chinese)
彭小静, 徐林, 郭泽. A 级太阳模拟器的光谱校正[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(11): 1324-1327.
- [4] Pan Yongqiang, Shi Yang, Hang Lingxia. Design and fabrication of air mass filter for solar simulator [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2010, 30(5): 470-473. (in Chinese)
潘永强, 施洋, 杭凌侠. 太阳能模拟器滤光片的研制[J]. *真空科学与技术学报*, 2010, 30(5): 470-473.
- [5] Meng Jiayi, Fu Xiuhua, Wang Di. Fabrication of spectral correction filter in solar simulator [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2010, 37(2): 50-53. (in Chinese)
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.
- [6] Gu Haonan, Fu Xiuhua, Zhangjing, et al. Development of the filter for solar spectrum simulated [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (natural science edition)*, 2012, 35(1): 21-24. (in Chinese)
顾浩楠, 付秀华, 张静, 等. 氙灯模拟太阳光谱滤光片的研制[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(1): 21-24.
- [7] Yang Linhua. Large solar simulator development technologies [J]. *Space Craft Environment Engineering*, 2012, 29(2): 173-178. (in Chinese)
杨林华. 大型太阳模拟器研制技术综述[J]. *航天器环境工程*, 2012, 29(2): 173-178.
- [8] Pan Yongqiang, Bai Tao, Hang Lingxia. Study on AM1.5 filter in solar simulator for photovoltaic module solar simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2484-2488. (in Chinese)
潘永强, 白涛, 杭凌侠. 光伏电池组件太阳模拟器 AM1.5 滤光片的研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2484-2488.
- [9] Bai Shengyuan, Gu Peifu, Liu Xu, et al. Optical stability of thin film filters [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(5): 576-580. (in Chinese)
白胜元, 顾培夫, 刘旭, 等. 薄膜滤光片的光学稳定性研究[J]. *光子学报*, 2001, 30(5): 576-580.
- [10] Fernandez M, Rico V J, Gonzalez A R, et al. UV irradiation effects on TiO_2 thin films [J]. *Phys Stat Sol*, 2008, 5(5): 1164-1167. (in Chinese)
- [11] Xi Yingxu, Yang Chen, Tian Yuxiang, et al. Influence of oxygen atmosphere on properties of hafnium oxide thin films [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2009, 29(3): 205-208.
惠迎雪, 杨陈, 田玉祥, 等. 氧气气氛对氧化铪薄膜性能的影响[J]. *西安工业大学学报*, 2009, 29(3): 205-208.
- [12] Deng Wenyuan, Li Chun, Jin Chunshui. Ultraviolet HfO_2 thin film by e-beam evaporation and ion beam sputtering [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(6): 630-636.
邓文渊, 李春, 金春水. 电子束蒸发和离子束溅射 HfO_2 紫外光学薄膜[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(6): 630-636.
- [13] Pan Yongqiang, Huang Guojun. Infrared optical properties of amorphous silicon films deposited by electron beam evaporation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2233-2237. (in Chinese)
潘永强, 黄国俊. 电子束热蒸发非晶硅薄膜红外光学特性[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2233-2237.