

文章编号: 1002-2082(2006)05-0415-04

短波通滤光片膜系设计

赵兴梅, 师建涛, 郭鸿香

(西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘要: 详细介绍用等效折射率概念设计短波通滤光片的原理和计算方法。根据原理和方法, 选择二氧化钛(TiO_2)作为高折射率材料、二氧化硅(SiO_2)作为低折射率材料。首先从理论上计算出用这2种材料设计的波长 $\lambda=950\sim 1150\text{ nm}$ 的短波通滤光片所需要的周期数, 然后给出短波通滤光片的主膜系和光谱曲线。由于据此周期数设计出的膜系光谱曲线在 $750\sim 810\text{ nm}$ 处的透过率不符合要求, 因此对该膜系进行了改进。依照改进的设计进行多次制备, 最终制备出了符合要求的短波通滤光片, 找到了最佳制备工艺和方法。最后, 对制备出来的短波通滤光片薄膜进行了各种环境实验。实验结果表明, 膜层的各项指标符合设计要求。

关键词: 短波通滤光片; 膜系设计; 等效折射率; 周期数

中图分类号: TN305.8

文献标志码: A

Film system Design for short-wavelength pass filter

ZHAO Xing-mei, SHI Jian-tao, GUO Hong-xiang

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The principle and calculation method to design short-wavelength pass filters with a concept of equivalent refractive index is presented in this paper. TiO_2 was chosen as the material of high refractive index and SiO_2 as the material of low refractive index based on the principle and method. Periodicity of short-wavelength pass filter at wavelength $\lambda=950\sim 1150\text{ nm}$ was theoretically designed according to the concept of equivalent refractive index. The main film system and the spectrum curve of the short-wavelength pass filter are presented. The design of the film system was corrected since its transmissivity did not meet the requirement at the range of wavelength $\lambda=750\sim 810\text{ nm}$. The effect of the main processing technology and the film thickness on the optical characteristics of the short-wavelength pass filter is described. As a result of the correction, the best way to make the film system was found. The film system prepared in this way was tested in different environment conditions. The experiment result shows that the specification of this film system can meet the requirement of the design.

Key words: short-wavelength pass filter; design of film system; equivalent refractive index; periodicity

引言

短波通滤光片具有让某一部分波长的光透过, 而让另一部分波长的光截止的特性, 因此被广泛地

应用于军品和民品的光学系统中。目前, 由于具有各种膜系设计软件, 为镀膜工作者提供了很大的方便, 反而使人们忽略了对理论的探讨。因此, 本文

收稿日期: 2005-07-23; 修回日期: 2006-01-10

作者简介: 赵兴梅(1977-), 女, 辽宁朝阳人, 硕士, 西安应用光学研究所工程师, 主要从事镀膜方面的研究工作。E-mail: xingmeizh@126.com

从理论的角度并结合自己的经验,通过实例对短波通滤光片的设计原理、材料选择原理和镀膜工艺做了详细的分析,并给出了设计该膜系的要点、关键工艺及结果。

1 原理

1.1 膜系等效折射率原理

$$M_{pq} = \begin{bmatrix} \cos \delta_p & (i \sin \delta_p) / \eta_p \\ i \eta_p \sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_q & (i \sin \delta_q) / \eta_q \\ i \eta_q \sin \delta_q & \cos \delta_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_p & (i \sin \delta_p) / \eta_p \\ i \eta_p \sin \delta_p & \cos \delta_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, δ_p 和 δ_q 分别为 p 和 q 层的有效相位厚度; η_p 和 η_q 分别为 p 和 q 层的等效折射率。对上式作乘法运算,化简后得

$$\begin{aligned} M_{11} &= M_{22} = \cos 2\delta_p \cos \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin 2\delta_p \sin \delta_q \\ M_{12} &= \frac{i}{\eta_p} \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin 2\delta_p \right] \\ M_{21} &= i \eta_p \left[\sin 2\delta_p \cos \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \cos 2\delta_p \sin \delta_q + \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} - \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin 2\delta_p \right] \end{aligned} \quad (2)$$

由于对称膜系的特征矩阵和单层膜的特征矩阵具有相同的性质,因此可以用 1 层特殊的等效单层膜来代换,即

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & (i \sin \Gamma) / E \\ i E \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中等效折射率 E 和位相厚度 Γ 分别为

$$\Gamma = \cos^{-1} M_{11} = \cos^{-1} \left[\cos 2\delta_p \cos \delta_q - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_p}{\eta_q} + \frac{\eta_q}{\eta_p} \right) \sin 2\delta_p \sin 2\delta_q \right] \quad (4)$$

这一结果很容易推广到由任意多层膜组成的对称膜系。

通过计算可知,周期性对称膜系 (PqP)^S 的特征矩阵 M^S 应为各基本周期特征矩阵的乘积,即

$$M^S = \begin{bmatrix} \cos \Gamma & i/E \sin \Gamma \\ i/E \sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix}^S \quad (5)$$

式中 S 为周期数。由以上分析可以证明

$$M^S = \begin{bmatrix} \cos S\Gamma & i/E \sin S\Gamma \\ i/E \sin S\Gamma & \cos S\Gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

(6)式表明,一个周期性对称膜系在其透射带中仍然存在一个等效折射率 E_s (等于其基本周期的等效折射率 E_s),其等效位相厚度 Γ_s 等于基本周期等效位相厚度 Γ 的 S 倍。基于这一特点,在考虑周期性对称膜系透射带中的透射率时,只考虑膜系基本周期的性能就可以了。这就极大地简化了周期性对称膜系透射带的设计工作。因此,等效折射率被广泛地应用于滤光片的设计中,也使之成为分析

由于组合 $\left(\frac{L}{2} H \frac{L}{2} \right)^S$ 有较好的短波通特性,因此我们在设计短波通滤光片时常采用此膜系。其中 L 代表低折射率层, H 代表高折射率层。它是一个对称膜系,以中间层为中心,两边对称。最简单的对称膜系由 3 层膜 [pqp] 组成,其特征矩阵为单层膜特征矩阵的连乘积,即

短波通滤光片的有效方法。

1.2 截止带宽度的计算原理

截止带的边界由 $M_{11} = -1$ 确定。由(2)式计算出对称膜系的截止带的宽度表达式为

$$\Delta\lambda = 2\Delta g \lambda_0 = \frac{4\lambda_0}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \quad (7)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为带宽; λ_0 为中心波长; n_H 和 n_L 分别为高、低折射率材料的折射率。

2 短波通滤光片的设计

短波通滤光片的参数要求是:在波长 λ 为 950 ~ 1 150 nm 处截止, $\rho > 99\%$;在波长 λ 为 600 ~ 800 nm 处透射, $\bar{\tau} > 96\%$ 。 $\bar{\rho}$ 为平均反射率, $\bar{\tau}$ 为平均透过率。

2.1 材料的选择

根据(7)式知道, $n_H - n_L$ 越大, $\Delta\lambda$ 越宽。考虑到短波通滤光片参数要求、材料的光谱性能以及 2

种材料的结合程度,通过实验,最终选择二氧化钛为高折射率材料,二氧化硅为低折射率材料。我们在实验中发现,在 $\lambda=1\ 000\ \text{nm}$ 处, $n_H=2.100\ 0$, $n_L=1.460\ 0$ 。把2个折射率代入(7)式可得

$$\Delta g=0.115\ 1$$

该膜系的截止宽度为

$$\Delta\lambda=1\ 000\times 2\times\Delta g\approx 230.2\ \text{nm}$$

根据设计要求,短波通滤光片的截止带宽度为200 nm。由以上计算可知,我们选择的材料符合设计要求。

2.2 确定膜系的周期数S

截止带的最大透射率 $\bar{\tau}<1\%$ 的要求为

$$T_R=\frac{16n_0n_g}{\left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2S}\left\{(n_0+n_g)^2+\left(\frac{n_0n_g-n_H}{n_H}\right)^2\right\}} \quad (8)$$

式中, T_R 为截止带中心波长处的透射率; n_0 为空气的折射率; n_g 为基底的折射率; S 为周期数。

下面计算截止带中心处的透射率 $\bar{\tau}$ 。在波长1000 nm处, $n_0=1$, $n_g=1.5041$, $n_H=2.100\ 0$, $n_L=1.460\ 0$ 。代入(8)式,通过计算可知,当基本周期数 $S=9$ 时,满足最大透射率 $\bar{\tau}<1\%$ 的设计要求。考虑到实际镀制过程中的误差及每层膜参数稳定性的影响,我们选定基本周期数 $S=12$ 。从上面分析可知,短波通滤光片的主膜系为

$$\text{Glass}/\left(\frac{L}{2}\text{H}\frac{L}{2}\right)^{12}/\text{Air}$$

2.3 匹配层的设计

根据我们设计的膜系,模拟出其透射率曲线,如图1所示。

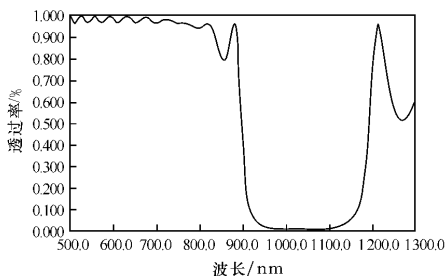


图1 短波通滤光片波长-透射率曲线

Fig. 1 The designed transmittance curve of short-wave-pass filter

从图1中可看出,在750~810 nm处的透射率并没有达到要求,这在膜系设计中是不允许的。笔者采用在基片和多层膜之间及介质和多层膜之间

改变膜层厚度的方法来消除此现象。改进设计后的曲线如图2所示。

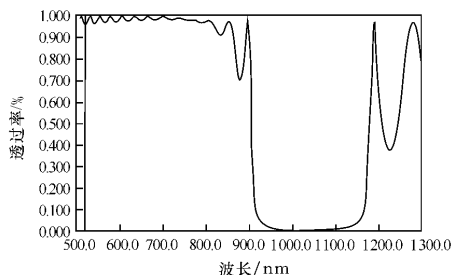


图2 改进后的短波通滤光片透射率曲线

Fig. 2 The improved transmittance curve of short-wave-pass filter

对比图1和图2,显然在750~810 nm处,图2的透射率曲线明显好于图1,达到了设计要求。

3 制备工艺

一般来讲,截止带高反射的要求比较容易实现。但是对于通带来讲,由于透射率对膜层的相对厚度十分敏感,因此在制备中很难把握,即使一个很小的误差也会引起通带的透射率发生变化。另外,匹配层是这个膜系的敏感层,其误差会引起通带波纹的改变。因此,精确控制膜层厚度是制备短波通滤光片的关键。

我们是在北仪生产的ZZSX-1100型真空镀膜机上完成实验的。图3是按该设计膜系制备的短波通滤光片的测试结果。从图3中可以看出透射率曲线与理论曲线(图2)基本吻合。如果消除零件背面4.25%的反射损失,则可见区的平均反射率达到98%左右,该膜系满足设计要求。

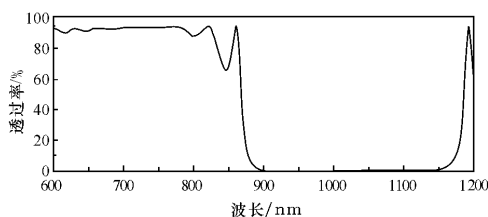


图3 短波通滤光片测试结果

Fig. 3 Measured result of the short-wave-pass filter

4 膜层的稳定性试验

为了检测短波通滤光片能否适应各种恶劣环

境,我们对它进行了以下几项试验。

4.1 低温试验

把零件放入冰箱,降温至 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持2 h,发现膜层仍能经受酒精乙醚混合液棉球的擦拭,其光谱曲线无变化。

4.2 盐水试验

将被镀零件放入温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,质量分数为5%的食盐溶液中浸泡2 h,然后用蘸酒精乙醚混合液的棉签擦拭,无脱膜现象,其光谱曲线也无变化。

4.3 潮湿试验

在温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为90%的环境中保持2天,其光谱曲线无变化。

通过以上各项试验我们知道,本文设计的膜系光谱曲线能够满足设计要求,可以应用在军品和民品中。

5 结束语

本文使用等效折射率的方法,从理论角度分析了短波通滤光片的设计方法及设计过程,并且给出了镀制该膜系的工艺要点,为从事短波通滤光片研究者提供了参考。

参考文献:

- [1] 唐晋发,顾培夫. 光学薄膜与技术[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
TANG Jing-fa, GU Pei-fu. Optical Film & Technology[M]. Beijing:China Machine Press,1994. (in Chinese)
- [2] 严一心,林鸿海. 薄膜技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1994.
YAN Yi-xin, LIN Hong-hai. Film & Technology [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry,1994. (in Chinese)
- [3] 周九林,尹树百. 光学薄膜技术[M]. 北京:国防工业出版社,1974.
ZHOU Jiu-lin, YIN Shu-bai. Optical Film & Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press,1974. (in Chinese)
- [4] 赵兴梅,师建涛,郭鸿香. 一种红外双半波滤光片的设计和制造方法[J]. 应用光学,2006,27(3):208-210.
ZHAO Xing-mei, SHI Jian-tao, GUO Hong-xiang. Design and fabrication of infrared double half-wave filter[J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 208-210. (in Chinese)

主动拒止技术将成就 21 世纪武器革命

美国空军代表就新出现的主动拒止技术(ADT)类武器声明:主动拒止系统(ADS)为自原子弹发明以来最具革命性的武器。主动拒止系统计划用于“群体控制”和要求采用非杀伤性或次杀伤性手段的应用方面,其行动具有完全无声无息的特点。

ADT 武器主要由一个电源、一个微波电磁辐射发射器(采用新型陀螺振子特种电子管)和一个将高能波束引向目标的碟状抛物面天线构成。系统的工作频率为95 GHz(波长 $\lambda=3.16\text{ mm}$),发射机功率为100 kW。操作员用天线组件上的轴校准微光视频摄像机和热像仪瞄准目标,用操作杆移动天线,按下扳机发射波束。

ADS 属于普通“威慑”类武器,而不是“惩罚性”或“致残”类武器。其微波辐射对人体组织的透射深度约0.3 mm,这恰好是痛觉神经的深度。其特点有:操作员可用波束瞄准人群中的单个目标或扫掠多个目标,或停聚起来压制狙击手,或形成能量壁垒;具有100%的固有命中率(无需考虑弹道因素),不用存储弹药(只需要电源),作用距离大大超过所有其他非杀伤性武器,甚至超过小型武器的火力范围。

(思 庸 供稿)