

文章编号:1004-4213(2011)02-0259-4

刑侦检测光学系统中干涉滤光片的设计与制备

牟鑫,付秀华,赵燕,贾岩

(长春理工大学 光电工程学院 光学工程和光学薄膜实验室,长春 130022)

摘 要:在刑侦现场勘查不同物证痕迹时,采用多波段光源对痕迹进行获取,而多波段光源是利用不同性能的干涉截止滤光片以获得不同波段的输出光.为了寻找衣物上体液和其它痕迹,利用干涉滤光片的组合方法,采取电子束蒸发并加以离子辅助沉积系统,根据薄膜干涉滤光片理论并借助膜系设计软件,制备了低成本高质量的 450~520 nm 波段高透射矩形波.通带透过率大于 99%,其它波段透过率小于 0.2%,陡度 $S < 3\%$,并通过了酸碱度环境的检测.重点讨论了膜系设计中波纹产生的原因及波纹的的压缩.

关键词:光学薄膜;真空镀膜;带通滤光片;离子辅助沉积;矩形波

中图分类号:O484

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114002.0259

0 引言

近几年,由于光学技术具有灵敏度高且不损坏物证的优势,在刑事科学领域得到了广泛的应用,特别是用于现场勘验寻找痕迹的多波段光源.由于物体(手印、体液、血迹等)本身对光的反射、吸收的特性不同,在不同波段的光源照射下,物体的表面将得到不同的亮度分布,从而显示出不同的细节.针对衣服上的体液^[1],选用 450~520 nm 波段高透过的矩形波照射能够消除背景荧光的影响,凸显证据.选择适当的光源波段,能加强对痕迹物证的显示,抑制干扰因素的出现,因此带通滤光片的质量起了决定性作用.滤光片的制备方法有很多,目前国外的制作水平很高,质量较好,但价格昂贵^[2].

本文通过干涉滤光片组合系统,制备了高透过,高截止深度的矩形波.性能要求为 450~520 nm 波段透过率大于 99%,其他波段(截止到 800 nm)透过率小于 0.2%,陡度 $S < 3\%$.

1 膜系设计

本文研究的干涉滤光片参量要求为 450~520 nm 波段平均透过率大于 99%,其它波段透过率小于 0.2%, $S < 3\%$.制备这种矩形波可以通过三种方法:其一是直接设计带通滤光片,但是需要的膜层较多,且通带的波纹很难压缩,截止带宽有限;其二是在 K9 玻璃两面分别镀制长波通和短波通,但是

这样就不能用于配套组合,一个滤光片对应一个矩形波,成本太高;其三是制备一个长波通和一个短波通组合使用,可以满足不同波段的矩形波,达到了高透射,宽截止.本文采用第三种方法制备,成本较低,可以任意组合配套使用.

1.1 材料的选取

作为光学薄膜材料,首先要考虑材料的透明度、吸收和散射性、折射率、机械牢固度和化学稳定性等.本文所研究的滤光片主要工作在可见波段,在该波段常用的高折射率材料有 Ta_2O_5 和 TiO_2 .由于 Ta_2O_5 的折射率低于 TiO_2 的折射率,要想达到相同的结果,采用 Ta_2O_5 就要增加很多层数,所以最终选择 TiO_2 作为高折射率材料^[3].而低折射率材料有 SiO_2 和 MgF_2 ,虽然 MgF_2 的折射率低于 SiO_2 ,但是 MgF_2 膜具有很高的张应力,而且其应力随着膜厚的增加而增加,膜厚累计达到一定厚度就会产生薄膜破裂,另外单层膜不宜偏厚,以免造成应力过大产生膜层龟裂、脱膜等.而 SiO_2 表现为压应力,与 TiO_2 的匹配很好,且 SiO_2 的光吸收很小,膜层牢固,抗腐蚀能力强^[4].材料的主要参量如表 1.

表 1 材料的主要参量

Table 1 The main parameters of materials

Material	Transparent area/ μm	Refractive index/ μm
TiO_2	0.35~12	2.2~2.4(0.55)
SiO_2	0.2~8	1.46(0.5)

1.2 膜系设计

根据使用要求在 K9 玻璃基底上镀制滤光膜,

基金项目:国家科技合作项目(No. 2008cc01262720)资助

第一作者:牟鑫(1985-),女,硕士研究生,主要研究方向为现代光学薄膜技术. Email:muxin9598@126.com

导师简介(通讯作者):付秀华(1963-),女,教授,主要研究方向为现代光学薄膜技术及现代加工技术. Email:goptics@126.com

收稿日期:2010-09-17;修回日期:2010-11-01

膜系设计的同时还要综合考虑设备条件、镀制工艺参量(如基底温度,沉积速率),真空度以及膜厚控制等方面.为了减少累积误差,总的层数不宜过多,所以膜系设计是要解决的难点之一.

要实现 450~520 nm 波段高透射的矩形波,需要制备以 440 nm 为中心波长的长波通和以 540 nm 为中心波长的短波通.干涉截止滤光片质量的好坏在于通带内波纹的平整度,因为随着层数的增加,波纹变得更为密集.所以设计的难点在于压缩通带内透射率曲线的波纹.

在通带内多层膜好像一个光学厚度和折射率都略微变化的单层膜,再无吸收的基片上镀以单层介质膜时,其反射率在两个极值之间振荡.当膜厚等于 $\lambda/4$ 偶数倍时,膜是一个虚设层,因此反射率就是光洁基片的反射率,即 $R_1 = (\eta_0 - \eta_g) / (\eta_0 + \eta_g)^2$. 其中 η_0 和 η_g 分别是入射介质和基片的有效折射率;当膜厚等于奇数倍时,取决于薄膜的折射率是高于还是低于基片的折射率,反射率会出现极大值或者极小值,即 $R_2 = (\eta_0 - \eta_i^2 / \eta_g)^2 / (\eta_0 + \eta_i^2 / \eta_g)^2$. 其中 η_i 是薄膜的有效折射率,它们是极大值和极小值的包络,也就是单层膜反射率曲线的包络.由于长波通滤光片的基础膜系为 $|0.5HL0.5H|^s$,短波通滤光片的基础膜系为 $|0.5LH0.5L|^s$. 它们都是对称的多层膜,将 η_i 换成对称周期的等效折射率 E ,即 $R_2 = (\eta_0 - E^2 / \eta_g)^2 / (\eta_0 + E^2 / \eta_g)^2$.

如果 R_1 与 R_2 相接近,即可以压缩通带波纹.由于工作波段为可见,基片材料为 K_9 , $R = 4.2\%$,所以通过改变基本周期内的膜层厚度是最简单有效的消除通带波纹的方法^[5],可以利用 TFCal 膜系设计软件进行优化.

长波通初始膜系为: Sub | (0.45H 0.9L 0.45H)⁵(0.5H L 0.5H)⁸ | Air, 不考虑另一面的反射,优化后的曲线如图 1.

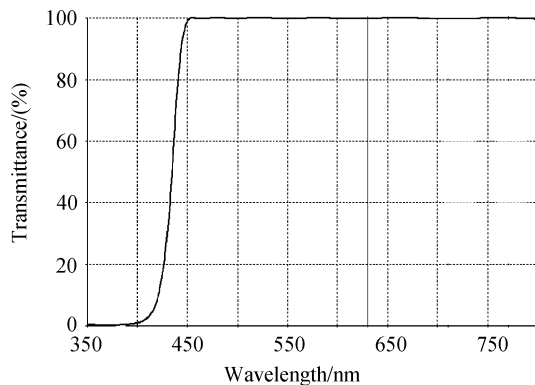


图 1 长波通滤光片优化后理论透射率曲线
Fig. 1 The theory design curve of long wave pass filters after optimization

由于长短波滤光片通要组合使用,在设计短波通滤光片时不但要考虑通带波纹的压缩,还要尽量使截止带宽度增加,以排除不同波段光的干扰.由高反射膜的设计理论可知,反射带的宽度决定于两种材料折射率之比值,计算公式为

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{2.3 - 1.46}{2.3 + 1.46} \right) = 0.143$$

$$\Delta \lambda = \lambda_0 / (1 - \Delta g) - \lambda_0 / (1 + \Delta g) \approx 2 \Delta g \lambda_0 = 2 \times 0.143 \times 500 = 143$$

式中 $n_H = 2.3$, $n_L = 1.46$, $\lambda_0 = 500$ nm 而实际反射带宽远远大于 143 nm,所以一个(HL)组合膜堆反射带宽不能满足要求,因此需要展宽反射带.对于多层介质膜,使用不同中心波长的 HL 膜堆组合进行叠加可以达到要求.利用这种方法,短波通的初始膜系为: Sub | (HL)⁷(1.2H1.2L)⁷H0.5L | Air, 不考虑另一面的反射,优化后的曲线如图 2.

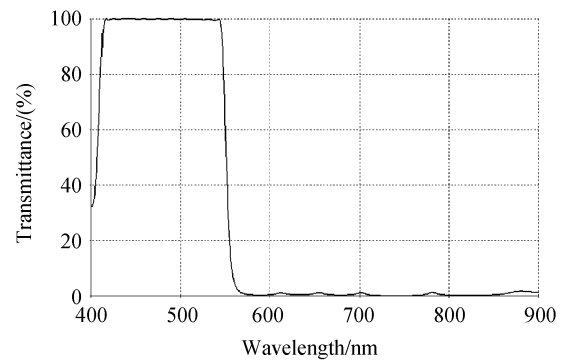


图 2 短波通滤光片优化后理论透射率曲线
Fig. 2 The theory design curve of short wave pass filters after optimization

考虑到另一面的反射,应用双有效界面法并结合膜系设计软件镀制宽带增透膜.采用 SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 和 MgF_2 为镀膜材料,设计膜系为 Sub | LA2BC | Air, 中心波长为 510 nm, 其中 L、A、B 和 C 分别代表 SiO_2 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 和 MgF_2 的 $1/4$ 中心波长的光学厚度.其 400~700 nm 波段范围内的理论设计光谱反射率曲线如图 3.

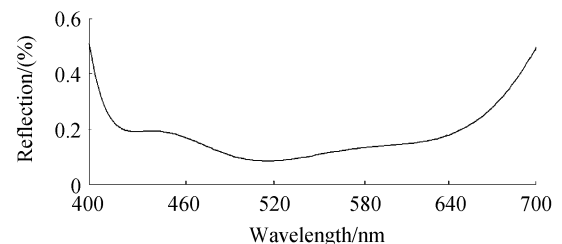


图 3 400~700 nm 波段范围内的理论设计光谱反射率曲线
Fig. 3 The theory design curve for the reflectance between 400~700 nm

2 薄膜制备

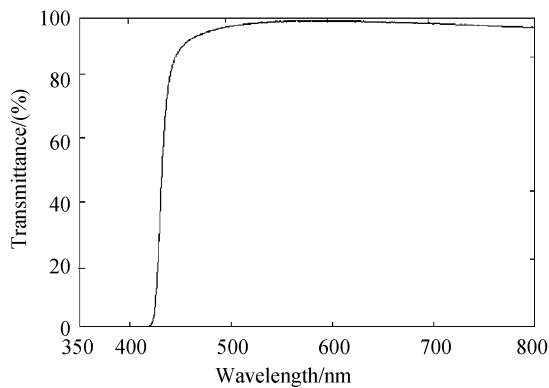
薄膜制备工作是在国产 TXX700 型真空镀膜机上完成的.使用电子枪蒸发材料,考夫曼离子源轰击基底,物理厚度和材料的沉积速率采用国际先进的 IC/5 石英晶体膜厚控制仪 (Thin Film Deposition Controller).

根据材料的特性,结合设备的工艺参量如真空度、温度等对材料折射率,沉积速率等性质的影响.当真空度达到所需要的压力时,烘烤镀件,烘烤温度达到 200 ℃ 后恒温 40 min,当真空度达到 3×10^{-3} Pa 时,打开考夫曼离子源轰击基底 10 min 后,开始蒸镀.经过多次实验,最终确定 TiO₂ 的沉积速率大约在 0.3 nm/s, SiO₂ 的沉积速率调整为 0.7 nm/s.对于 SiO₂ 最好提前预熔,去除杂质,对于 TiO₂,镀制过程中必须充分预熔,同时控制电子枪束流,以免束流过大或者材料局部温度过高造成材料喷溅,并且 TiO₂ 和 SiO₂ 均易失氧,所以在镀制过程中必须充氧,使真空度达到 1×10^{-2} Pa.另外,在镀制长波通滤光片时,某些 TiO₂ 层厚度很薄,不易控制,这时适当调整它的沉积速率为 0.2 nm/s.以减少控制误差.

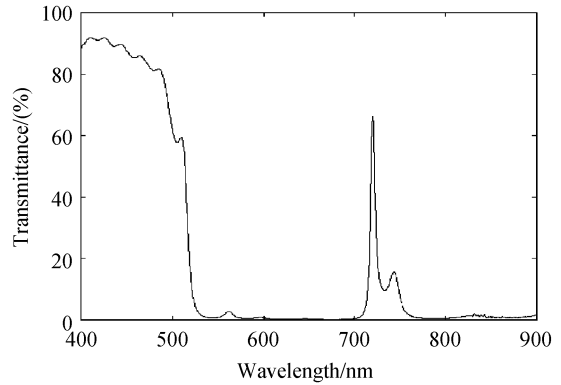
3 测试结果及分析

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计对样品进行测试,实验光谱曲线如图 4.

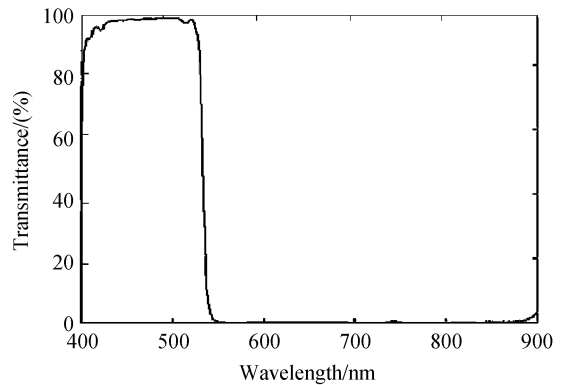
图 4 中(a)和(b)分别表示实际镀制的长波通和短波通干涉滤光片,图 4(c)是修改膜系后实际镀制的短波通曲线.由图 4(b)可以看出,通带平均透过率很低,更为严重的是在截止带 720 nm 左右出现了较大的次峰,利用设计软件模拟分析,膜系总共为 30 层,其中敏感层占到一半以上,并且这些敏感层都聚集在前面的 10 多层,比较集中,难以准确监控,因此会产生很大的控制误差.



(a) Measured transmittance curve of long wave pass filter



(b) Measured transmittance curve of short wave pass filter



(c) Measured transmittance curves of short wave pass filter after modified

图 4 干涉滤光片优化后实际透射率曲线

Fig. 4 Measured transmittance curve of interference filters after optimization

另外,由于机器设备本身存在控制误差,通过实验镀制几层,发现实际镀制的厚度比设计的厚度少,这样就产生了累积误差,通过模拟,相应的减少前面 10 层的厚度,结果会出现与测试结果类似的曲线.所以选择重新设计膜系,尽量减少敏感层并使其分散开.

重新设计膜系,初始膜系结构为 Sub|(HL)⁸(1.25H1.25L)⁹H0.5L|Air,由图 4(c)可以看出已经不存在次峰了,满足了要求.干涉滤光片组合后的实际透过率曲线如图 5.

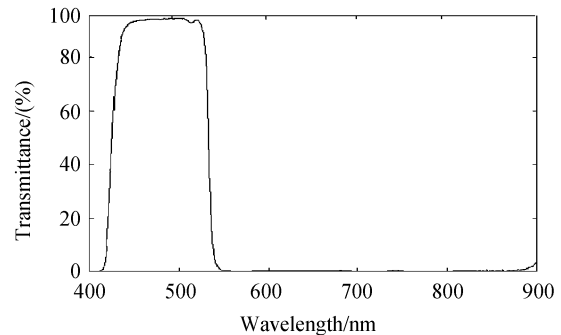


图 5 干涉滤光片组合 450~520 nm 波段实际透射率曲线

Fig. 5 Measured transmittance curve for interference filter assembled in 450~520 nm

图 5 的矩形波段 450~520 nm 平均透过率是 99.3% > 99%, 其它波段的透过率 0.13% < 0.2%, $S < 3\%$, 满足性能要求. 由此可以看出, 通过干涉滤光片的组合可以得到高质量的矩形波, 降低了成本.

为了保证光学元件的安全可靠性, 对所镀制的样品进行了酸碱度的试验. 把干涉滤光片样品分别放在浓度为 5% 稀酸和稀碱溶液中 6 h, 取出样品, 清洁表面并进行检测, 膜层没有明显变化.

4 结论

将镀制样品组合并应用到多波段光源的滤光片系统中. 滤光片转盘便将相应的滤光片转到灯源前面, 对灯源发出的光进行过滤, 所以选用 450~520 nm 的矩形滤光片可以实现对衣服上体液的现场勘查和分析. 另外, 采用相同的方法, 对微量物证例如某些射击残余物的勘察要用 450~720 nm 波段高透射的矩形波, 这样只要制备一个以 730 nm 为中心波长的短波通, 与 440 nm 的长波通组合就

可以实现. 所以通过改变波长组合, 还可以实现对现场血液、指纹、足迹的搜寻和检验.

参考文献

- [1] YANG Ji-hu, BAI Yi, SUN Jian. Application of alternative light source in forensic science[J]. *Modern Optics*, 2007, **13**(5): 56-58.
杨冀虎, 白毅, 孙建. 多波段光源在物证检验中的应用[J]. *现代光学*, 2007, **13**(5): 56-58.
- [2] LIU Jing. Discuss the principle of Multi-band light source[J]. *Forensic Science and Technology*, 2004, (3): 49-51.
刘静. 浅谈多波段光源原理[J]. *刑事技术*, 2004, (3): 49-51.
- [3] 钟迪生. 真空镀膜—光学材料的选择与应用[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001: 20-28, 181-190 245-265.
- [4] GU Pei-fu, ZHENG Zhen-rong, ZHAO Yong-jiang, et al. Study on the mechanism and measurement of stress of TiO₂ and SiO₂ thin films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6459-6462.
顾培夫, 郑臻荣, 赵永江, 等. TiO₂ 和 SiO₂ 薄膜应力的产生机理及实验探索[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6459-6462.
- [5] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 118-154.

Design and Manufacture Interference Filter Applied in Criminal Investigation and Test Optical System

MU Xin, FU Xiu-hua, ZHAO Yan, JIA Yan

(Laboratory of Optical Thin Film, Department of Optical Engineering, School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to find out different material evidences in criminal spot, multi-band lamp house was adopted to achieve all kinds of field traces. Multi-band lamp house system can utilize interference cut-off filters of different performances to output different wave-band beams. In order to find body fluids on clothes and other traces, the high transmittance rectangular wave between 450~520 nm waveband with low-cost and high-quality was prepared through the interference filter combination method. The electronic beam depositing method with the aid of ion deposition system was also adopted based on the interference filter theory and film design software during the preparation. It is demanded that transmissivity in pass wave is more than 99%, the other wave-band is less than 0.2%, and its slope is less than 3%.

Key words: Optical thin film; Vacuum coating; Band-pass filter; Ion-beam assisted deposition; Rectangular wave