

文章编号: 0253-2239(2010)03-0903-04

双通感红外日夜两用型滤光膜的研制

耿似玉¹ 付秀华¹ 谭志² 李珊¹

(¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; ² 中南创发有限公司, 广东 深圳 518129)

摘要 选取二氧化钛与二氧化硅作为薄膜材料,借助膜系设计软件优化设计膜系。采用离子源辅助沉积的真空镀膜方法,通过调整镀膜工艺参数,减少膜厚控制误差,在石英基底上成功镀制了符合使用要求的多波段滤光膜。所镀膜层在 420~640 nm 与近红外 920~960 nm 波段的平均透射比大于 95%,680~880 nm 和 990~1100 nm 波段的平均透射比小于 3%,能够承受恶劣的环境测试,完全满足红外夜视摄像机的使用要求。

关键词 薄膜光学;干涉滤光膜;光学低通滤波器;离子辅助沉积

中图分类号 O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0903

Design and Manufacture of Day-and-Night Double Sensitive Infrared Filter Film

Geng Siyu Fu Xiuhua Tan Zhi Li Shan

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Chungnam Innovations Limited Company, Shenzhen, Guangdong 518129, China

Abstract TiO₂ and SiO₂ are chosen as the film materials. A Macleod software is used to optimize the film systems. Vacuum depositing method with the aid of ion assistant deposition systems is adopted, through optimizing technical parameters, reducing thickness error, multi-band filter film is successfully deposited on the substrate of quartz crystal. In the condition of vertical incidence, the average transmittance exceeds 95% in 420~640 nm and 920~960 nm, below 3% in 680~880 nm and 990~1100 nm. It conforms to the environmental stability standards, completely meets the demands of infrared night-vision camera.

Key words thin film optics; interference filter film; optical low-pass filter; ion assistant deposition

1 引言

根据 CCD(电荷耦合器件)的光谱响应特性,与可见光相比,在近红外区域它仍具有 20%左右的敏感能力^[1]。一般的 CCD 摄像机为了保证正常光谱下的色彩还原能力,改善分辨率,需要在 CCD 的器件前面加一块红外截止滤光片(OLPF),以滤掉红外光的干扰。但是对于目前广泛使用的红外夜视摄像机,则需利用 CCD 的这一感光特性,通过镀制干涉滤光膜,实现 24 h 不断监控的目的。对于镀制在光学低通滤波器镀制在石英晶体上,普通的红外截

止滤光膜^[2~4]和红外感光源在 850 nm 处要求的滤光膜^[5]等,国内外都做了多方面的研究,但是对于红外感光源在 920~960 nm 范围要求且同时满足 4 个波段的多波段滤光膜比较少见。并且由于石英的折射率与空气不同,在界面上会产生反射而降低入射光的强度,为降低反射所造成的损失,要在 OLPF 晶片的另一面上镀抗反射膜(AR Coating),以提高可见光的透射比^[6]。

本文选取 TiO₂ 和 SiO₂ 作为高低折射率材料,并研究了材料的光学及机械特性。借助膜系设计软

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-05-22

基金项目: 省部产学研合作专项资金项目(2007A090302007)资助课题。

作者简介: 耿似玉(1985—),女,硕士研究生,主要从事光学薄膜技术方面的研究。E-mail: siyu0619@163.com

导师简介: 付秀华(1963—),女,教授,主要从事光学薄膜技术及半导体激光器制造工艺等方面的研究。

件设计并优化膜系,通过改进监控方法和优化工艺参数,重点解决了镀制非周期多层膜的膜层厚度控制精度和半波孔的消除问题。

2 膜系设计

2.1 膜系光谱参数要求

根据红外感光源的要求,具体的膜系设计光谱参数如表 1 所示。

表 1 膜系设计参数

Table 1 Design specification of the coating

Wavelength /nm	Transmittance /%
420~640	>95 (AVG)
650±5	~50
680~880	<3
920~960	>95(AVG)
970±5	~50
990~1100	<3

其中 420~640 nm 为白天监控波段,920~960 nm 为夜间监控波段。本膜系要求 420~640 nm 宽透射带和 920~960 nm 高透射,较以往的普通型红外截止滤光片及感光源在 850 nm 处透过型的滤光片,无论在膜系设计还是薄膜制备方面都有很大的难度。

2.2 材料选取

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。研究的滤光片主要工作在可见和近红外波段,在该波段常用的高折射率材料有 Ta_2O_5 和 TiO_2 ,但是由于 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;并且通过实验发现,该材料与 TiO_2 材料相比,沉积速率不稳,所以最终选择 TiO_2 作为高折射率材料。而低折射率材料选择 SiO_2 ,是因为 SiO_2 的光吸收很小,膜层牢固,抗腐蚀能力强。材料的主要参数如表 2 所示。

表 2 材料的主要参数

Table 2 Main parameters of the materials

Material	Transparent region /nm	Refractive index
Ta_2O_5	350~10000	2.1(550 nm);2.0(1060 nm)
TiO_2	350~12000	2.2~2.4(550 nm)
SiO_2	200~8000	1.46(500 nm)

2.3 膜系设计

根据使用要求在石英基底上镀制滤光膜,膜系设计的同时还要综合考虑设备条件、镀制工艺及膜厚控制等方面,所以此膜系设计是解决的难点之一。设计

时先暂不考虑背面的影响,初始膜系为 $Sub|(HL)^{20}|Air$,中心波长为 750 nm。其中 H 代表高折射率材料 TiO_2 的 $1/4$ 中心波长的光学厚度,L 代表低折射率材料 SiO_2 的 $1/4$ 中心波长的光学厚度,Sub 表示基底,Air 表示空气。采用 TFC 膜系设计软件对其进行优化^[7],优化后的膜系为 $Sub|0.16H 0.2L 2.5H 0.36L 0.11H 0.6L 1.09H 1.15L 0.53H 0.16L 0.4H 0.33L(HL)^{10} 1.45H 0.36L 0.16HL 0.17H 0.33L 1.44H 0.68L|Air$,其可见与近红外 400~1100 nm 波段范围内的理论设计光谱透射比曲线如图 1 所示。

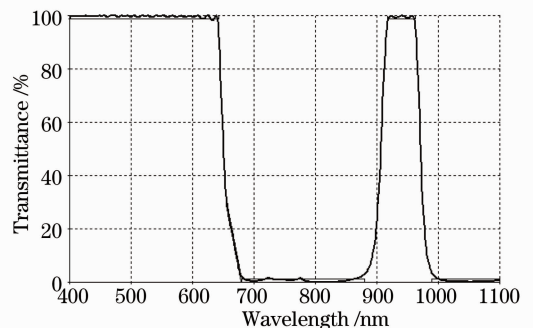


图 1 理论设计光谱透射比曲线

Fig. 1 Theoretical design curve for the transmittance

对于背面增透膜系的设计,应用双有效界面法并结合膜系设计软件,同时也综合考虑工艺参数。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 2 所示。

3 薄膜制备

镀膜设备采用的是日本 OPTORUN(光驰)公司制造的型号为 OTFC1300D-CHN 镀膜机。该设备采用电子束真空镀膜的方法,配置双电子枪和离子辅助蒸发系统——17 cm 射频离子源,主要作用是在成膜前对基片进行预清洗并使基片表面活化,改善膜基过渡层的结构和性质,在沉积过程中对溅射材料的分子或原子进行辅助轰击,增加膜层的附着力和堆积密度。采用 Hom2-R-VIS350 型光学膜厚控制仪,使用上反射式,单色光直接监控法监控膜层的光学厚度。物理厚度和材料的沉积速率采用 XTC/2 石英晶控仪进行控制,该晶控仪配备了 6 个石英探头,可自动切换。

首先对基片进行再抛光、清洗,用浓度为 99.5% 的丙酮擦拭后放在工件架上抽真空。当真空度达到

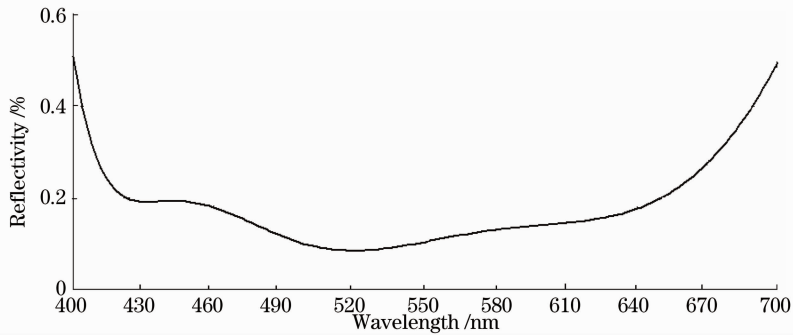


图2 理论设计光谱反射率曲线

Fig. 2 Theoretical design curve for the reflectance

所需要的压力时,对镀件加热烘烤,烘烤温度达到 220 ℃后恒温 18 min。当真空度达到 1×10^{-3} Pa 时,打开射频离子源和中和器轰击基底 10 min 后,开始蒸镀。

经过多次实验发现,如果 TiO_2 的沉积速率过大,膜层表面容易有喷点且产生吸收; SiO_2 的沉积速率过大,膜层有较大厚度误差,而且不容易控制,所以最终确定 TiO_2 的沉积速率约在 0.4 nm/s, SiO_2 的沉积速

率调整为 0.8 nm/s。对于 TiO_2 ,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 TiO_2 和 SiO_2 均易失氧,所以在镀制过程中必须充氧。

在沉积过程中, TiO_2 和 SiO_2 的离子源主要技术参数如表 3 所示,其中 Ar-1,Ar-2 分别表示通入射频离子源和中和器中的两路氩气;Acc Vol 表示中和器的加速电压; E/B 表示发射电流与束流的比值。

表3 TiO_2 和 SiO_2 的离子源沉积参数Table 3 Ion sources deposition parameters for TiO_2 and SiO_2

	Beam		Neutralizer		Gas capacity / (mL / min)		
	Voltage / V	Current / mA	Acc Vol / V	(E/B) / %	O ₂	Ar-1	Ar-2
Clean coating	500	500	600	150	50	6	8
TiO ₂	1200	900	600	150	50	0	8
SiO ₂	905	900	600	150	45	6	8

为改善膜层的强度,消除内应力,将镀膜后的样品直接在镀膜室中进行真空退火处理,温度升到 300 ℃恒温 1 h,然后自然冷却。

4 实验结果及分析

采用 Lambda750 型分光光度计对样品进行测试,每个镜片均检测 5 个位置以上,确保样品的稳定性、一致性和重复性。实验光谱曲线如图 3 所示。

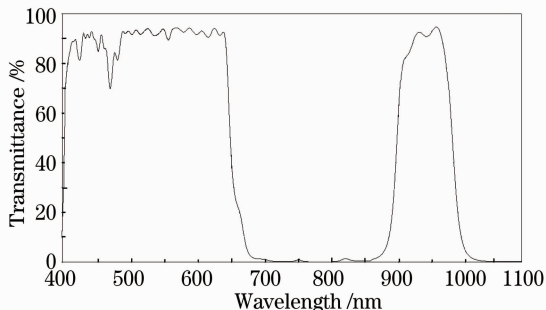


图3 单面镀膜透射比曲线

Fig. 3 Transmittance curve of single surface coated

由图 3 可以看出,曲线在 420~640 nm 之间存在许多小的波纹,920~960 nm 之间有一个小次峰。可见区 480 nm 附近出现一个很大的次峰,称为半波孔。利用 Macloed 软件模拟分析,小波纹和半波孔的产生是由实验过程中 TiO_2 膜层的整体厚度偏少,镀膜材料的折射率非均匀性和色散,以及镀膜过程中膜厚控制误差积累造成的。图 4 为本文所用镀膜机上 TiO_2 的折射率色散曲线。修改 TiO_2 的晶控 Tooling factor 值来调整 TiO_2 厚度,根据软件模拟的折射率非均匀性和色散结果对膜系细微修改,继续进行实验。采用光控控制周期膜层和 Macloed 软件中 Sensitivity 值较大的层,非周期膜层用晶控控制,从而减少监控误差^[8]。调整后的实验样品光谱曲线在可见区已经不存在半波孔。最后在其背面镀制相应波段增透膜,其双面镀膜光谱曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,在可见波段 420~640 nm 和 920~960 nm 波段范围内的平均透射比为 95%,680~880 nm 和 990~1100 nm 波段的平均透射比小于 3%,满足设计要求。

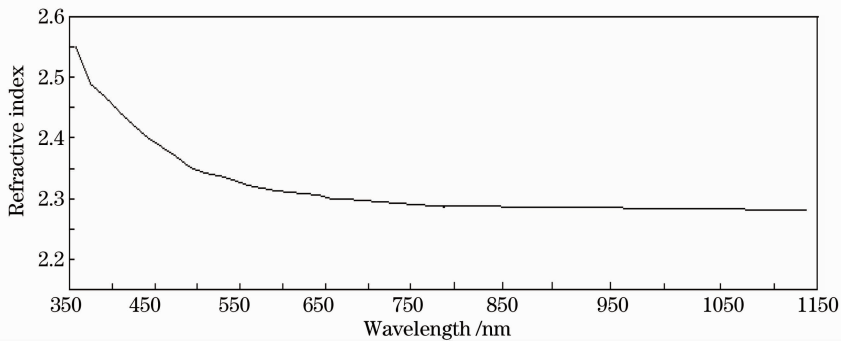
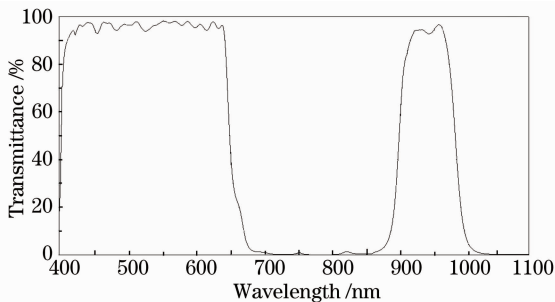
图 4 TiO₂ 材料的折射率色散特性Fig. 4 Index dispersion characteristics of TiO₂

图 5 双面镀膜实测透射比曲线

Fig. 5 Measured transmittance curve of double surface coated

在使用中对膜层要求的耐用性条件为:中心波长无漂移;单片均匀性好无色度差异;膜层牢固。所以对所镀制的样品依次进行以下环境测试:

1) 用 NICHIBAN CT-18 胶带紧贴镀膜表面,然后沿膜面垂直方向迅速拉起,重复 5 次,未有脱膜现象;

2) 在 90% 相对湿度, 65 °C, 500 h 后,膜层无变化;

3) 在 70 °C ~ -40 °C 温度,测试 10 个温度循环后,膜层未有脱落。

经过环境测试后的样品,再用分光光度计测试,透射比曲线没有变化,满足使用要求。

5 结 论

采用电子束真空镀膜的方法加以离子辅助蒸发系统,镀制样品后,将其应用到红外夜视摄像机中,实现了其日夜监控的目的。通过改进监控方法,调整工艺,镀制的样品在可见光波段的透射率曲线仍

有一些小波纹,红外波段还存在小次峰,有待进一步的实验研究。

参 考 文 献

- Li Guoxuan. Several question's viewpoints about waterproof infrared night vision camera[J]. *Chinese Public Security*, 2007, (5): 72~73
李国选. 关于防水红外夜视摄像机几个问题的观点[J]. *中国公共安全*, 2007, (5): 72~73
- Hong Dongmei, Zhu Zhen. A near infrared interference filter[J]. *Laser and Infrared*, 2000, **30**(2): 119~120
洪冬梅, 朱 震. 近红外干涉滤光片[J]. *激光与红外*, 2000, **30**(2): 119~120
- ZhaoXingmei, Shi Jiantao, Guo Hongxiang. Film system design for short-wavelength pass filter[J]. *J. Appl. Opt.*, 2006, **27**(5): 415~418
赵兴梅, 师建涛, 郭鸿香. 短波通滤光片膜系设计[J]. *应用光学*, 2006, **27**(5): 415~418
- H. A. Macleod. Thin-Film Optical Filters[M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, Third Edition, 2001. Chapter 6. 2, 223~255
- Yuan Hongtao, Zhang Guiyan. Design and manufacture of a day and night optical low pass filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 510~514
袁宏韬, 张贵彦. 一种日夜两用光学低通滤波器的研制[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(4): 510~514
- Pan Yijie, Lin Jiaming, Shang Qingkun *et al.*. Frequency and spectrum characteristic of the optical low pass filter[J]. *Opt. Technol.*, 2005, **31**(4): 513~515
潘奕捷, 林家明, 商庆坤 等. 光学低通滤波器的频率特性和光谱特性[J]. *光学技术*, 2005, **31**(4): 513~515
- Wang Wenliang, Xiong Shengming. Multiobjective optimization approach of optical thin film design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 2026~2030
王文梁, 熊胜明. 光学薄膜自动设计的多目标优化方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 2026~2030
- Zhu Meiping, Yi Kui, Guo Shihai *et al.*. Effect of thickness monitoring error and inhomogeneity of witness glass on film thickness monitoring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1107~1111
朱美萍, 易 葵, 郭世海 等. 膜厚监控误差及监控片不均匀对膜厚监控的影响[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1107~1111