

可见与近红外激光通信系统光学滤光膜的研制

付秀华¹ 寇雷雷^{1*} 张 静¹ 许阳月¹ 张 燃²

(¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)
²中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要 在空间光通信中,光学系统起着非常重要的作用,光学薄膜技术已成为制作光学元件的关键技术。对 532、808、1064、1550 nm 激光工作的 4 个波段,选择 Ti_3O_5 和 SiO_2 作为高低折射率材料,借助于膜系设计软件,采用电子束蒸发和离子辅助沉积的方法设计并制备了激光滤光膜。镀膜后的基片在 808 nm 处的透射率大于 90%,532、1064、1550 nm 处的反射率均大于 99%。重点解决了 808 nm 透射区半波孔的问题,通过对基片进行清洁、减少薄膜的吸收和进行真空退火等方法提高了膜层的激光损伤阈值。经过性能测试和评估,满足系统的要求。

关键词 薄膜;激光滤光膜;离子辅助沉积;激光损伤阈值;空间光通信

中图分类号 O484 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.1207001

Fabrication of Optical Filter Film for Visible and Near-Infrared Laser Communication System

Fu Xiuhua¹ Kou Leilei¹ Zhang Jing¹ Xu Yangyue¹ Zhang Ran²

(¹College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
²China Baicheng Ordnance Test Center, Baicheng, Jilin 137001, China)

Abstract Optical system plays an important role in space optical communication, and optical thin-film has become the key technology of the optical components. The laser filter film is designed and fabricated aiming at four bands of laser work of 532, 808, 1064, 1550 nm, by choosing Ti_3O_5 and SiO_2 as high and low refractive index materials. It is used the design software of film system and adopts the method of electron beam evaporation and ion assisted deposition. The transmissivity of substrate after coating film at 808 nm is better than 90%, at 532, 1064, 1550 nm, reflectance is better than 99%. It is focused on half-wave hole in 808 nm transmission area and improved the laser damage threshold of film by cleaning the substrate, reducing the absorption of the film and vacuum annealed. The laser clear filter meets the requirements of the system after a performance test and evaluation.

Key words thin films; laser clear filter; ion assisted deposition; laser induced damage threshold; space optical communication

OCIS codes 310.1210; 310.1860; 310.6805; 310.6845

1 引 言

第一台红宝石激光器诞生后,空间光通信的研究开始起步^[1],美国是最早开展相关研究的国家。欧洲空间光通信基于德国、西班牙、法国等国的合作。德国致力于发展高功率激光卫星空间系统。日本主要进行卫星间的空间光束跟踪技术方面的研

究,并已取得了较好的成果。由于空间光通信在军事侦察卫星、跟踪和数据中继卫星等方面有应用,我国自 20 世纪 70 年代初就对它开始了研究,如今也取得了长足的进步。空间光通信对激光滤光膜^[2~4]的要求越来越高,整个激光系统的性能与光学薄膜的抗激光能力有着密切的关系。为了能够同时满足

收稿日期: 2012-06-21; 收到修改稿日期: 2012-07-29

基金项目: 吉林省重大科技攻关项目(2009ZDGG007)资助课题。

作者简介: 付秀华(1963—),女,博士,教授,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: goptics@126.com

* 通信联系人。E-mail: kouleilei860313@163.com

4个波段的激光滤光膜,本文针对空间光通信对薄膜的特殊要求,研究了膜厚监控方法、材料光学特性和沉积工艺参数。

2 膜系设计

该激光滤光膜的具体要求是当光以 10° 角入射时满足532、1064、1550 nm三个波段反射率 R 均大于99%,808 nm处透射率 T 均大于90%。膜系设计很关键,通常在满足光谱特性的前提下,必须考虑实际制备的情况及膜厚控制的容差。

2.1 膜料选择

选择薄膜材料时必须考虑膜料之间的应力匹配、光谱特性、机械特性等问题,针对膜系的要求,至少需要选择高低折射率两种材料进行设计,对于多层膜而言,低折射率材料通常选择 SiO_2 ,此材料在 $0.2\sim 9.0\ \mu\text{m}$ 吸收小、膜层牢固、具有较高的激光损伤阈值。高折射率材料可供选择的有 HfO_2 、 ZrO_2 、 Ta_2O_5 、钛的氧化物等,钛的氧化物既能与 SiO_2 也能与基底K9较好地匹配。钛的氧化物有: Ti_2O 、 TiO 、 Ti_2O_3 、 Ti_3O_5 、 Ti_4O_7 、 TiO_2 等,其中选择 Ti_3O_5 为高折射率材料,因为它相对稳定、阻温性好、价格低、耐酸碱腐蚀性强、薄膜相对较硬。

2.2 膜系设计过程

单面设计:根据设计要求,要实现532 nm高反,808 nm高透,采用一个长波通即可满足,但1064 nm与1550 nm同时要求反射,截止带很宽,一个反射膜堆不能满足这么宽的截止带,故采用 $\text{Sub}|A(\text{H L})^S B(\text{H L})^S C(\text{H L})^S|\text{Air}$ 作为基本膜

系,其中Sub代表基底,H与L分别代表高、低折射率材料,S代表膜系的周期数。用Tfcalc膜系设计软件对膜层进行优化,膜系为 $\text{Sub}|1.11\text{H } 0.55\text{L } 0.58\text{H } 1.26\text{L}\cdots|\text{Air}$,共53层,物理厚度约为 $8\ \mu\text{m}$,当光以 10° 角入射时,808 nm处的透射率大于90%,532、1064、1550 nm处的反射率均大于99%。然而从膜系结构看出各层膜均为任意厚度,若采用石英晶控法控制膜厚,随着膜厚的增加,控制灵敏度下降,累积误差会很大,因此需要改进设计方案。

双面设计:即两个膜系组合后达到预期指标的方法。第一面满足532 nm高反和808 nm高透, $\text{Sub}|(0.5\text{H L } 0.5\text{H})^S|\text{Air}$ 长波通作为基本膜系,采用光控与晶控相结合的方法,用膜系设计软件Tfcalc对部分膜层进行优化,膜系为: $\text{Sub}|0.58\text{H } 0.84\text{L } \text{H } 0.97\text{L}\cdots|\text{Air}$,共20层,物理厚度约为1398 nm,设计曲线如图1(a)所示。

第二面设计应满足808 nm高透,1064 nm、1550 nm高反,采用 $\text{Sub}|A(\text{H L})^S B(\text{H L})^S|\text{Air}$ 两个反射膜堆叠作为基本膜系,用Tfcalc对部分膜层进行优化,膜系为: $\text{Sub}|2.49\text{H } 2.71\text{L } 1.72\text{H } 0.21\text{L}\cdots|\text{Air}$,共30层,物理厚度约为5543 nm,设计曲线如图1(b)所示。

从图1可以看出,考虑制备过程中的控制误差,532、1064、1550 nm处的反射带和808 nm处的透射带都相应展宽,这是充分考虑了实际镀膜过程中因工艺参数的不稳定和制备中的人为误差而带来的波长漂移。

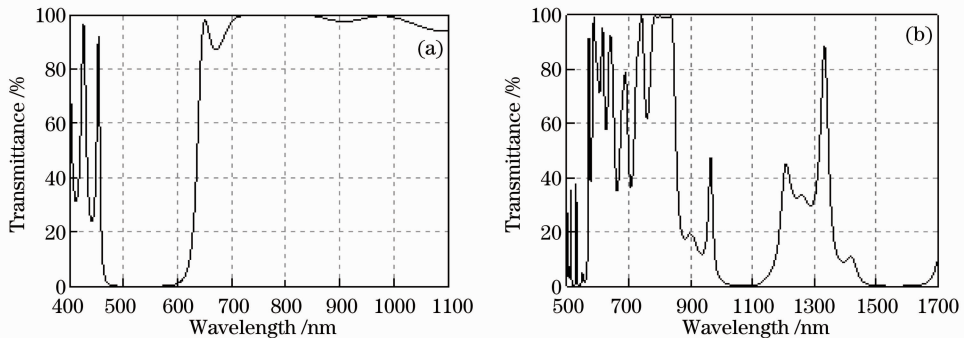


图1 滤光片膜系设计曲线。(a)第一面;(b)第二面

Fig. 1 Design curves of optical filter film. (a) The first surface; (b) the second surface

3 滤光片制备

薄膜实验是在国产惠州奥普康900型真空镀膜机上完成的,该设备配有双电子枪和考夫曼离子源,用石英晶体仪控制薄膜的厚度和沉积速率。蒸镀前

先对基片进行清洗,将清洗干净的基片放入基片架上,抽真空,当真空度达到 2.0×10^{-2} Pa时,加烘烤,烘烤温度控制在 $290\ ^\circ\text{C}$,恒温30 min,开离子源轰击基底10 min后开始蒸镀。膜厚控制采用的是

光控和晶控结合的方法,因膜层厚度较厚,势必会造成误差累积,为减少监控误差,周期膜层采用光控,非周期膜层采用晶控。在 Ti_3O_5 和 SiO_2 的镀制过程中, Ti_3O_5 的蒸发速率设置为 0.3 nm/s , SiO_2 的蒸发速率为 0.7 nm/s ,控制充入氧气流量使真空室的压强保持在 $1.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 左右,并采用离子源辅助沉积^[5],制备完成后经过自然冷却后取出。

提高激光损伤阈值^[6,7]一直是激光滤光膜的难题,它限制了激光器的输出功率,影响因素有很多,如基片的清洁^[8]、薄膜的吸收、薄膜的真空退火等。

为了提高激光损伤阈值,沉积前,采用离子清洗减小表面缺陷。在实验中充入高纯氧气(MgF_2 除外),氧离子的掺杂可以使薄膜的化学计量比提高,从而降低了吸收。采用离子源辅助沉积的方法提高膜层的致密性。镀制后进行阶段性退火,可以降低吸收和改善薄膜的结晶状况,从而有效地提高激光损伤阈值。

4 测试结果与分析

4.1 光谱性能测试

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计对可见区与近红外区分别进行测试。经过多次反复实验,最后实测光谱曲线如图 2,图 3 所示。

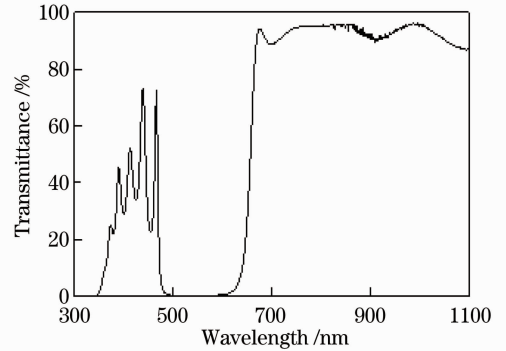


图 2 滤光片第一面测试曲线

Fig. 2 Measurement curve of the first surface of filter

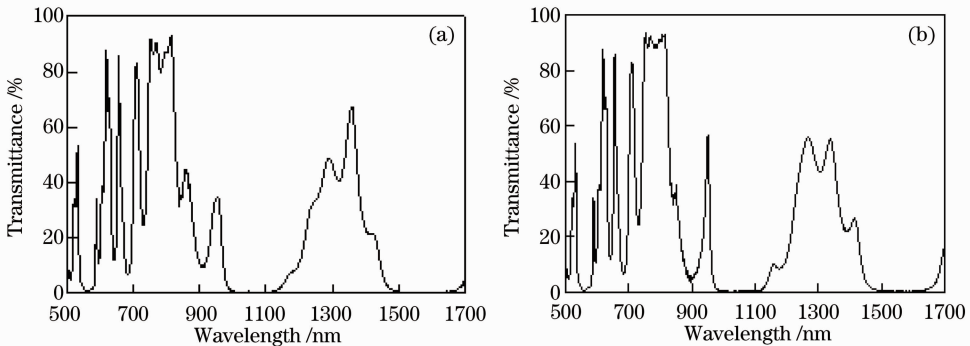


图 3 滤光片第二面膜系实测曲线。(a)修改前;(b)修改后

Fig. 3 Measurement curves of the second surface of filter. (a) Before and (b) after modification

测试发现第一面满足要求,第二面在 808 nm 附近出现了半波孔^[9]。利用软件模拟发现, Ti_3O_5 的整体厚度偏少,修改 Ti_3O_5 的晶控 Tooling 值来调整 Ti_3O_5 的厚度,发现半波孔的问题只能得到一定程度的改善还是无法完全消除,所以采取调整中心波长的方法,来避开 808 nm 这个点。由图 2、图 3(b)可以看出, 532 、 1064 、 1550 nm 处的反射率分别为 99.94% 、 99.70% 、 99.56% ; 808 nm 处的透射率为 91.177% 。从结果中发现, 532 、 1064 、 1550 nm 这三个点都与设计曲线相差很小,只有 808 nm 由于有半波孔的出现,使得与设计曲线有一定的差异,但也均达到了使用要求。

4.2 其他物理性能的测试

抗激光测试:利用 1064 nm 单点连续脉冲全固态激光器,半峰全宽为 20 ns ,采用 1-on-1 方式进行损伤阈值测试,测试结果为 $5.02 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。

附着力测试:用粘性强度大于 3 N/cm^2 ,宽度为 3 cm 的胶带紧贴薄膜表面,然后沿着薄膜表面垂直方向迅速拉起,重复十几次,未见有脱膜现象。

温度测试:将样品放入高温烘烤箱中,让其温度稳定增加,当温度升到 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时保持 2 h ,自然降温后取出放在 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境中,保持 2 h ,膜层未有明显变化。

机械强度测试:用干纱布包住重物,放在膜层表面垂直反复摩擦,膜层没有破损。

上述测试完成后再次测试样品的透射率光谱曲线,曲线基本没有变化。

5 结 论

组合分别设计的两面,解决了因单面设计时厚度过厚而带来的控制精度低的问题。利用光控与晶控相结合的方法,制备出光学性能优良且具有较高

激光损伤阈值的空间光通信激光滤光膜。改善了可见区的半波孔的问题,但是实际测量曲线与理论设计曲线还存在差异,仍然达不到理论设计的要求,膜厚的控制方面还存在误差,应改进监控方法,在提高808 nm 透射率的同时降低 532、1064、1550 nm 反射率。

参 考 文 献

- 1 Hu Yu, Liu Hua. Space laser communications technology and its development[J]. *Journal of UEST of China*, 1998, **27**(5): 453~461
胡 渝, 刘 华. 空间激光通信技术及其发展[J]. *电子科技大学学报*, 1998, **27**(5): 453~461
- 2 He Caimei, Fu Xiuhua, Sun Yulin *et al.*. Study and fabrication of multi-band laser filter film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1550~1554
贺才美, 付秀华, 孙钰林等. 多波段激光滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1550~1554
- 3 Shen Yi, Liu Dongmei, Fu Xiuhua *et al.*. Research and preparation of the ultraviolet communication filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1207005
沈 奕, 刘冬梅, 付秀华等. 紫外光通信滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1207005
- 4 Yang Yongliang, Liu Guojun, Fu Xiuhua *et al.*. Study and fabrication of filter film in laser identification between friend or foe system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0131002
杨永亮, 刘国军, 付秀华等. 激光敌我识别系统中滤光膜的研制[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0131002
- 5 Zhang Dawei, He Hongbo, Shao Jianda *et al.*. Preparation of high power laser films based on ion beam assisted deposition[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(1): 57~60
张大伟, 贺洪波, 邵建达等. 离子束辅助沉积制备高功率激光薄膜的研究[J]. *激光技术*, 2008, **32**(1): 57~60
- 6 Liu Qiang, Lin Libin, Jiang Xiaodong *et al.*. Study on improving damage threshold of dielectric films[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7): 637~641
刘 强, 林理彬, 蒋晓东等. 提高氧化物介质膜层损伤阈值的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7): 637~641
- 7 Ma Xiaofeng, Zhang Dongping, Wang Yingjian *et al.*. Fabrication and properties study of harmonic beam splitter at 1064 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 835~838
马小凤, 张东平, 王英剑等. 1064 nm 倍频波长分离膜的制备与性能研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 835~838
- 8 Hu Haiyang, Fan Zhengxiu, Liu Ye. Effect of impurities on laser induced damage to 1.06 μm optical coatings [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(6): 489~492
胡海洋, 范正修, 刘 晔. 杂质对光学薄膜激光损伤阈值的影响[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(6): 489~492
- 9 Huang Wei, Zhang Yundong. Method for eliminating the half-wave hole of short-wave passed filter[J]. *Optical Instruments*, 1999, **21**(4-5): 145~148
黄 伟, 张云洞. 消除短波通截止滤光片半波孔的方法[J]. *光学仪器*, 1999, **21**(4-5): 145~148

栏目编辑: 韩 峰