

空间光通信系统三波段滤光膜的研究

潘永刚 刘冬梅 张 静 付秀华 杨道奇

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 空间激光通信通常采用干涉截止滤光膜对不同波段的光谱进行分光。着重介绍了近红外三波段光学滤光片的研究与制备。根据膜系设计理论,分别选择 TiO_2 和 SiO_2 作为高、低折射率材料,借助膜系设计软件设计优化了合理的膜系,实现了 770~860 nm 及 1530~1575 nm 光谱范围双波段的高透过和 1615~1700 nm 波段的高反射。采用电子枪离子辅助沉积系统进行制备。优化工艺参数,通过调整补偿挡板使膜厚均匀性控制在 3% 以内。虽然制备膜层较厚,但经检测其光学性能、机械性能及耐环境能力均满足使用要求。用轮廓仪检测所制备膜层的面形,其峰谷值变化达到预期要求。

关键词 薄膜;干涉滤光膜;离子辅助沉积;牢固度;峰谷值

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.013101

Research of Three-Wave-Band Filters Used in Free Space Communication System

Pan Yonggang Liu Dongmei Zhang Jing Fu Xiuhua Yang Daoqi

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Jilin, Changchun 130022, China)

Abstract Filter is often used to interfere the spectral spectrum into different bands in free space laser communication. This article mainly introduces the research and preparation of a three-band near infrared optical filter. According to the design theory, TiO_2 is selected as the material of high refractive index and SiO_2 as the low one to realize high transmittance in two bands of 770~860 nm and 1530~1575 nm, and high reflection in the band of 1615~1700 nm. The film stack is designed by film design software, and electron gun and ion-assisted deposition system are used for film preparation. The process flow is optimized through the adjustment of process parameters to get a good thickness uniformity of less than 3% by adjusting the compensation bezel. Although the film is thick, it meets the use requirement as shown by the tests of optical properties, mechanical properties and resistance to the environment. In addition, the quality of the coating surface successfully passes the test of the surface profile instrument, meanwhile, the variation of profile peak-to-valley (P-V) value can meet the design requirements.

Key words thin films; interference filter; ion assisted deposition; durability; peak-to-valley value

OCIS codes 310.1210; 310.1620; 310.4925; 310.6805

1 引言

空间激光通信在通信领域占有独特的地位^[1]。空间激光通信对各通信波段光谱要求不同,就光学元件而言,通常的方法就是采用多波段光谱滤光片,尤其是在现代军用装备对空间的激光通信中。需要保证在恶劣的环境下顺利完成对目标的搜索、识别与追踪,而且经常需要多光源共用一个窗口以减少空间体积和对外目标,这都对光学系统中的光学元件的薄膜性能提出更高要求。资料显示,激光通信大多对 532、808、1064

收稿日期: 2011-08-10; 收到修改稿日期: 2011-09-15; 网络出版日期: 2011-10-30

基金项目: 省部产学研结合项目(2010A090200006)资助课题。

作者简介: 潘永刚(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜、非球面加工等方面的研究。

E-mail: pyg_optics@163.com

导师简介: 刘冬梅(1970—),女,副教授,主要从事光学薄膜、光学工艺及测试等方面的研究。

E-mail: sjx8811@sohu.com(通信联系人)

及 1550 nm 等单个波长有要求,而对于本文所研究的 3 个特定波段并且严格要求表面峰谷(P-V)值的滤光膜还没有相关报道^[2~4]。

本文主要针对 770~860 nm,1530~1575 nm,1615~1700 nm 这 3 个激光通信的波段进行分束,解决的关键问题是实现双波段的高透射及邻近波段的高反射。

2 镀膜材料的选择

根据空间激光通信使用要求,选择合适的薄膜材料。选择薄膜材料的依据为:透明区光谱范围、光学常数相对稳定、吸收损耗小、抗腐蚀性能强等。根据膜系设计原理,滤光膜至少选择高低折射率两种材料进行设计,其中符合要求的镀膜材料如表 1 所示^[5]。

表 1 薄膜材料
Table 1 Coating materials

Material	Wavelength /nm	Refractive index	Clear area / μm	Firmness	
				Hardness	Resistance to wet
Ta ₂ O ₅	550	2.16	0.35~10	Very hard	Excellent
H _i	500	2.1	0.36~7	Very hard	Excellent
TiO ₂	550	2.3	0.40~10	Very hard	Excellent
MgF ₂	550	1.38	0.11~10	Hard	Excellent
SiO ₂	550	1.46	0.20~9	Very hard	Excellent
ZrO ₂	550	2.05	0.30~12	Very hard	Excellent

由于 TiO₂ 在可见和近红外波段折射率较高,与 SiO₂ 匹配有利于减少薄膜的层数,从而可减小膜层内应力。经过多次实验验证,当膜层较厚时 TiO₂ 和 SiO₂ 的应力匹配好、膜层强度高、机械性能好,故选择 TiO₂ 和 SiO₂ 材料。

3 膜系设计与制备

3.1 材料折射率计算

虽然选择了 TiO₂ 和 SiO₂ 作为镀膜材料,也给出了参考折射率,但是由不同的设备和工艺制备出来的膜层折射率有很大差异。为获得镀膜材料在制备过程中的实际折射率色散分布,必须在特定工艺条件下进行多次实验模拟。由公式

$$n_g = \frac{1 + \sqrt{1 - \sqrt{T}}}{1 - \sqrt{1 + \sqrt{T}}}, \quad (1)$$

$$n = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}} n_g, \quad (2)$$

式中 T 为基片的透射率, R 为镀膜后的反射率。计算折射率数值具体方法为:选择厚度为 2 mm 的 K9 玻璃作为基片,首先测出基片透射率,其次分别在基片上镀制一定厚度的 TiO₂、SiO₂ 并测出反射率。由(1)、(2)式计算出 TiO₂ 和 SiO₂ 的色散曲线如图 1 所示。

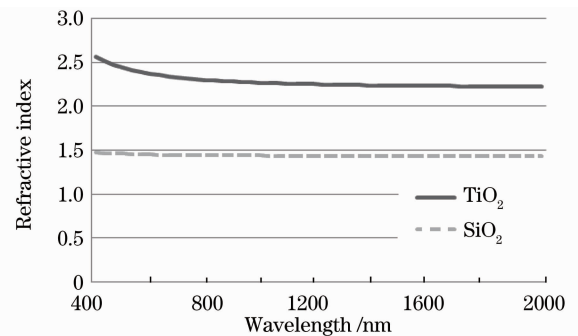


图 1 TiO₂ 和 SiO₂ 的色散曲线

Fig. 1 Dispersive curves of TiO₂ and SiO₂

3.2 膜系设计

从滤光膜的光谱曲线观察,其近似于一个短波通,故将短波通膜系设为初始膜系,基础结构为 Sub|0.5L (HL)^{*}H0.5L|Air,Sub 表示基底,H 和 L 分别为高低折射率材料。但是与短波通不同的是,滤光膜要求有两个波段实现高透射,因此采用依次加薄层和改变优化参数的方法对基础膜系进行优化设计。经过多次模拟优化,得到膜系的理论光谱曲线,如图 2 所示。

优化后的膜系为:Sub|3.154L 2.855H 2.346L 5.874H 2.748L 3.284H 3.488L 3.696H 3.534L 3.535H 2.819L 3.101H 3.989L 3.544H 4.009L 3.257H 3.126L 3.448H 3.786L 2.815H 2.693L 4.669H

3.041L 5.089H 3.164L 7.183H 1.619L|Air。从膜系结构来看,各膜层均为任意厚度;从制备技术考虑,必须采用石英晶体控制法^[6]控制薄膜厚度。但是经过实验验证,随着膜厚的增加和制备工艺环境的变化,膜层厚度控制误差增大,经过多次改进,控制误差虽然得到一定程度的控制,但制备结果仍不能满足设计要求。实际制备的滤光膜光谱曲线与理论结果差异很大,如图3所示。

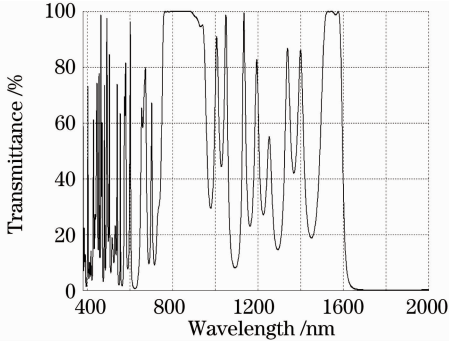


图2 理论设计光谱曲线

Fig. 2 Theoretically designed spectral curve

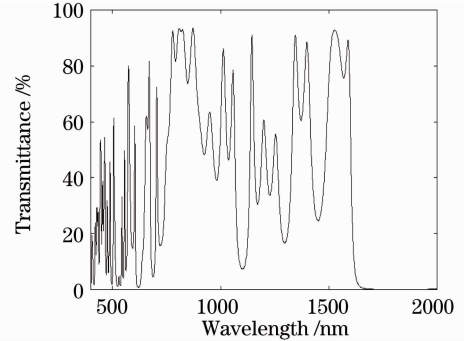


图3 实际制备的滤光膜的光谱曲线

Fig. 3 Practical coating spectral curve

众所周知,对于多层膜,采用光学极值法控制的精度要高于石英晶控法。采用光学极值法,即 $nd = m\lambda/4$ ($m = 1, 2, 3, \dots$), 不管 n, d 如何变化其乘积为常数;而石英晶体控制的是质量厚度,可间接控制几何厚度 d ,若当 n 变化时 d 不变,则其乘积 nd 随之改变。为了减少控制误差,应该重新确定设计方案,尽可能选用周期膜系,减少非周期膜系的厚度,将石英晶控法和光学极值法相结合,可以提高膜厚的控制精度。当采用光学极值法控制时可借助石英晶体控制其蒸发速率和电子枪速率。

膜系设计整体思路为:膜系结构首先满足高反射区的要求,然后分别在基底与膜层和膜层与空气之间加匹配层^[7],在两个透射区形成增透膜。为了避免在 770~860 nm 高透射区出现半波孔^[5],选取设计波长为 $\lambda = 1750$ nm,半波孔在 875 nm 出现,对透射区不产生影响。

具体设计如下。由设计要求可以看出,透射区 1530~1575 nm 与截止区 1615~1700 nm 之间的过渡区宽度为 40 nm。经过多次模拟得知,当层数为 22 层时,过渡区宽度为 30 nm,可满足要求。在此基础上利用计算机膜系软件优化模拟,经过多次修正,在基底和多层膜之间加入 7 层匹配层、在多层膜和空气之间加入 6 层匹配层,膜系的整体结构为 Sub|0.563L 0.793H 1.435L 0.864H 1.075L 0.951H 1.042L (HL)⁻¹¹ 1.053H 0.976L 1.089H 0.966L 1.062H 0.472L|Air。膜系的前 7 层和后 6 层主起到增透作用,中间 22 层起高反作用,这样有利于膜系的分析与制备。其理论设计光谱曲线如图 4 所示,不考虑另一面反射时,770~860 nm 和 1530~1575 nm 的平均透射率为 99% 以上,1615~1700 nm 平均反射率为 99.9%,满足设计要求。

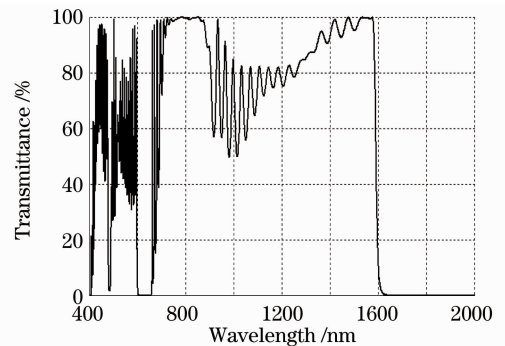


图4 理论设计光谱曲线

Fig. 4 Theory spectral curve

3.3 制备工艺

薄膜制备过程在 900 型真空镀膜机上完成。该机配有两个 e 型电子枪、考夫曼离子源、GM-X07 型光学膜厚控制仪和 SQC-310 型晶控仪。

3.3.1 离子束清洗预处理

采用离子源进行清洗预处理。用离子源对基片进行清洗(约 15 min),在光学显微镜下观察清洗结果,如果选择合适的离子源参数,离子清洗可有效去除二次污染,同时可以活化基底表面,并且在基底表面上形成伪扩散层^[8],有助于提高膜层与基底表面之间的结合力,还能提高薄膜的抗激光损伤能力。经过多次优化,离子源参数如表 2 所示。

表 2 清洗处理离子源参数

Table 2 Cleaning parameters of ion source

Plate voltage /V	Accelerating voltage /V	Anode voltage /V	Neutralization current /A	Cathode current /mA	Ion beam intensity /mA
420	350	55	20	15	70

3.3.2 离子源参数优化

离子束加速电压和电流是影响薄膜质量的重要参数,加速电压决定离子与离子之间能量传递的大小,离子束电流决定离子束对薄膜粒子碰撞的频度,二者均影响薄膜的填充密度。

图 5 所示为单层 TiO_2 薄膜在 550 nm 处折射率随加速电压变化的实验曲线。由图 5 可以看出,当加速电压在 300~400 V 之间时,折射率较高而且变化较小。故加速电压在 300~400 V 之间选择。

此外,当加速电压为 350V 时,改变离子束流制备的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 多层膜经过水中浸泡 24 h 后,测量漂移量和离子束流之间的关系,结果如图 6 所示。可以看出,当离子束流在 50~60 mA 之间时,漂移量在 2~3 nm 之间。

当选取加速电压 350 V,离子束流 55 mA 时,制备的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 多层膜透射率下降(在 800 nm 处下降约 5%)。经反复实验和分析,判断是由于离子源功率偏大,导致对膜层刻蚀严重,从而造成能量损失。经过多次实验,最后选定加速电压 300 V,离子束流 50 mA。

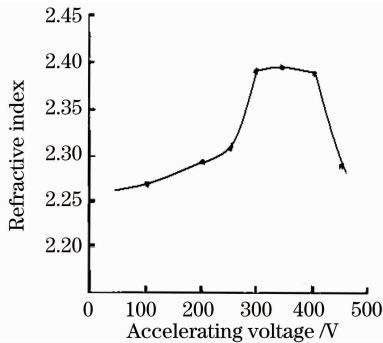


图 5 加速电压与折射率的关系

Fig. 5 Relationship between accelerating voltage and refractive index

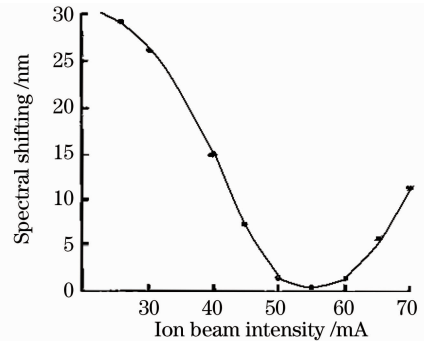


图 6 离子束流与光谱漂移量的关系

Fig. 6 Relationship between ion beam intensity and spectral shifting

4 测试结果

4.1 薄膜光学性能测试及分析

利用 UV-3150 分光光度计测得光谱透射率和反射率曲线,分别如图 7、图 8 所示。

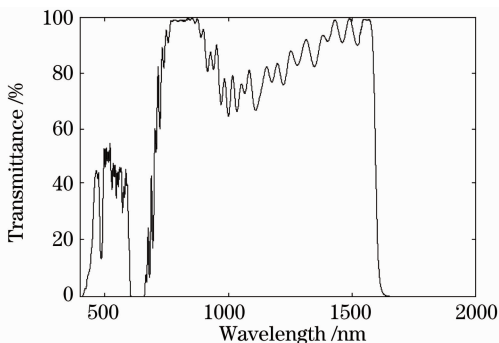


图 7 透射率实测光谱曲线

Fig. 7 Measured spectral transmittance curve

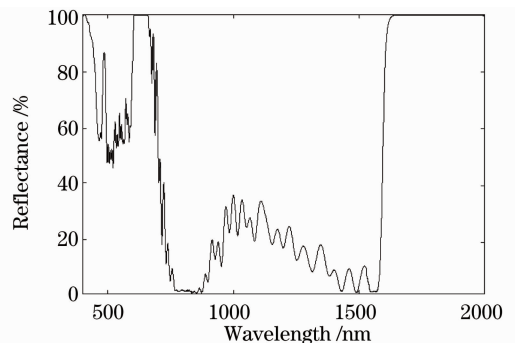


图 8 反射率实测光谱曲线

Fig. 8 Measured spectral reflectance curve

由光谱曲线可以看出,所镀膜层在 770~860 nm 波段平均透射率达到 98.5%,1530~1575 nm 波段平均透射率达到 98.0%,1615~1700 nm 波段平均反射率达到 99.8%。实际光谱透射率曲线与理论设计光谱

透射率曲线特别是双高透过波段有差异,这是由于实验制备过程较长,导致镀制过程中前后工艺条件有所不同,造成折射率略有差异,从而使膜层整体不匹配,最终影响高透过波段的透射率。

4.2 膜层强度测试

4.2.1 环境测试

高温测试:将无包装试件放入 200 °C 烤箱烘烤 2 h 后,膜层没有起皮、龟裂或脱落,并且测得膜层的光谱曲线没有任何变化。

雨淋测试:将无包装试件放在雨滴直径为 0.5~4.5 mm 的雨水中 40 min,经检查膜层无明显变化,测得膜层光谱透射率曲线在中心波长处往长波漂移 3 nm,原因是虽然通过离子源辅助沉积提高了膜层致密性,但膜层间仍存在一定的间隙,吸收水分,使得光谱曲线往长波移动,然而并不影响使用。

4.2.2 P-V 值测试

用泰勒轮廓仪分别对样品镀膜前后进行测试,测试结果如图 9、图 10 所示。

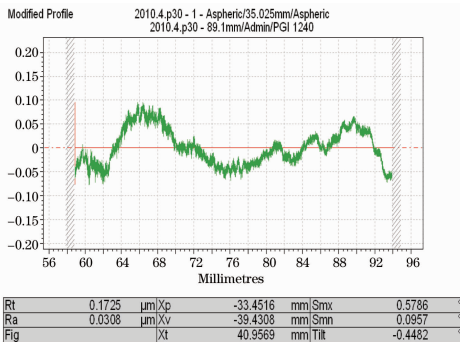


图 9 镀膜前表面测试曲线

Fig. 9 Profile of the surface before coating

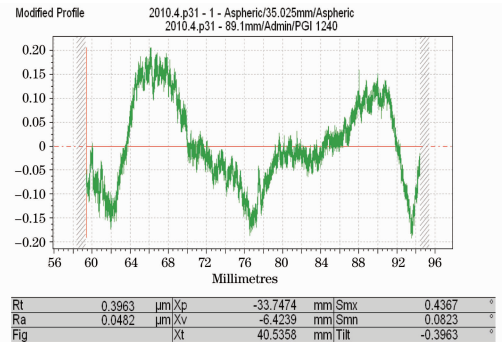


图 10 镀膜后表面测试曲线

Fig. 10 Profile of the surface after coating

由镀膜前后表面测试曲线可以看出:P-V 值 R_t 由 0.1725 变化到 0.3936,均方根值 R_a 由 0.0308 变化到 0.0482,表面 P-V 值下降了 0.2238。这主要是由于制备过程中成膜不均匀以及喷点造成,但变化在允许范围内。

5 结 论

在滤光片的研制过程中,选择 TiO_2 和 SiO_2 作为镀膜材料,通过改变膜层厚度,让出现半波孔的位置向长波方向移动,避免在 770~860 nm 高透射波段出现半波孔。膜厚控制采用光学极值控制和石英晶体控制相结合的方法,并以光学极值控制为主,避免了折射率变化引起厚度变化,提高了控制精度。采用离子源辅助沉积,通过优化离子源参数特别是选择合适的加束电压和离子束流,提高膜层牢固度,同时降低离子源对膜层表面的刻蚀。镀膜前后滤光片面形精度在预期范围变化,P-V 值下降了 0.2238。制得的滤光片基本能满足使用要求,但是在双波段透射区透射率与理论设计相比有一定差异,有待于以后进一步研究。

参 考 文 献

- Li Rui, Zhao Hongli, Zeng Dexian. Free-space laser communication and its key technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(2): 152~154
- 李睿, 赵洪利, 曾德贤. 空间激光通信及其关键技术[J]. *应用光学*, 2006, **27**(2): 152~154
- Li Dawei, Xu Cheng, Zhao Yuan'an *et al.*. Detamination of optical thin films induced by 1064 nm laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 764~767
- 李大伟, 许程, 赵元安等. 1064 nm 激光脉冲致光学薄膜分层剥落损伤特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 764~767
- 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
- He Caimei, Fu Xiuhua, Zhang Jiabin *et al.*. Study and fabrication of visible and IR dual-band broadband antireflection coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2929~2933

- 贺才美, 付秀华, 张家斌 等. 可见与红外双波段宽带增透膜的研制[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2929~2933
- 5 Tang Jinfu, Gu Peifu, Liu Xu. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 133~134, 239~242
- 唐晋发, 顾培夫, 刘 旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 133~134, 239~242
- 6 Li Zhengzhong. Thin Film Optics and Coating Technology[M]. Taipei: Art Gallery Book Press, 2004. 373~374
- 李正中. 薄膜光学与镀膜技术[M]. 台北: 艺轩图书出版社, 2004. 373~374
- 7 Hong Dongmei, Yue Wei. Research of optical film for middle infrared lasers[J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(12): 1157~1159
- 洪冬梅, 岳 威. 中红外激光器薄膜的研制[J]. 激光与红外, 2006, **36**(12): 1157~1159
- 8 Yu Donghai, Wang Chengyong, Cheng Xiaoling. Recent development of magnetron sputtering processes[J]. *Vacuum*, 2009, **46**(2): 19~25
- 余东海, 王成勇, 成晓玲. 磁控溅射镀膜技术的发展[J]. 真空, 2009, **46**(2): 19~25