

临近空间激光通信链路光学系统中滤光膜的研制

付秀华¹ 莫朝燕¹ 黄金龙¹ 莫舒蕙² 吴博琦¹

(¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)
(² 海南珠江源高级职业技术学校, 海南 海口 570216)

摘要 为了提高临近空间激光通信的信噪比, 避免杂散光的干扰, 通常采用滤光片对信号进行过滤和采集。针对通信系统滤光片的参数要求, 选择合适的薄膜材料, 结合制备工艺, 对膜系进行设计。采用电子束加热蒸发和离子辅助沉积技术镀制薄膜。采用与膜系评价函数和膜层敏感度相关的数学模型, 优化出膜层敏感度较低的膜系, 制备的滤光片满足临近空间激光通信链路光学系统的使用要求, 并通过了环境测试。

关键词 薄膜; 滤光膜; 膜系设计; 膜层敏感度; 临近空间通信

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0907003

Design and Fabrication of Near Space Laser Communication Link Optical System Filter Film

Fu Xiuhua¹ Mo Zhaoyan¹ Huang Jinlong¹ Mo Shuhui² Wu Boqi¹

(¹ College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
(² Hainan Zhujiangyuan Institute of Vocational Technology, Haikou, Hainan 570216, China)

Abstract In order to improve the signal-to-noise ratio of the near space laser communication and avoid interference from stray light, we often use filters to filter and collect the signal. According to the parameter requirements of filters in the communication system, we select appropriate film materials with the preparation technology to design the film system. Electron beam heating evaporation and ion-assisted deposition system are adopted for film preparation. Using the film system's evaluation function and the mathematical model related to the film sensitivity, the sensitivity of the film is optimized. The filters meet the requirements of the use of near space laser communication link optical system, and pass the environmental testing.

Key words thin films; filter; film system design; film sensitivity; near space communication

OCIS codes 310.3840; 120.2440; 060.4510

1 引言

临近空间主要指距地面 20~100 km 的空域, 这段空间在信息通信、航空遥感、情报收集以及侦查监视等方面都有着非常重要的战略价值^[1-2]。临近空间激光通信是实现其价值的重要手段, 为了保证光通信信号传输的性能, 提高通信信号的信噪比, 高质量的滤光片是通信系统中不可或缺的。国内外对窄带滤光膜有了多方面的研究^[3-5], 但在满足 808 nm 窄带透射的同时, 还要满足 1550 nm 高透

射, 且具有宽截止带的滤光膜还未见报道。

本文结合沉积工艺对滤光膜的膜系进行了较深入的研究, 采用数学模型对膜系进行评价和分析, 优化了膜系结构。

2 膜系设计

2.1 膜层材料的研究

临近空间激光通信系统的参数要求如表 1 所示。

收稿日期: 2013-03-28; 收到修改稿日期: 2013-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(60977052)

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

表 1 膜系设计光谱参数

Table 1 Spectral parameters of film system design

Spectral range	Technical parameter
808 nm	$D_{FWHM} \leq 15 \text{ nm}, T > 98\%$
600~1450 nm except 808 nm band	$T < 0.2\%$
1550 nm	$T > 99\%$

依据参数要求,选取透明区在可见及近红外波段的膜料,并考虑其折射率、膜层间的应力匹配、成膜后的机械性能及化学稳定性,根据实验室及测试结果选择 Ti_3O_5 和 SiO_2 作为高低折射率材料。

Ti_3O_5 是钛的低价氧化物中较稳定的化合物,与 TiO_2 膜料相比, Ti_3O_5 在制备过程中氧含量不变,且制备的薄膜折射率较稳定,另外 Ti_3O_5 在可见及近红外折射率较高。 SiO_2 具有良好的牢固度和抗腐蚀性能,且成膜质量好,并与 Ti_3O_5 有较好的应力匹配。在膜系设计方面,与其他常规高低材料相比膜层层数更少,同时可提高截止深度。

2.2 薄膜设计

膜系设计时应综合考虑设备条件、监控精度、膜层与基底的匹配等因素。从参数要求可知,808 nm 通带宽度小于 15 nm 同时还要满足在 1550 nm 高透,根据膜系设计理论,初始膜系应选择带通滤光片的膜系结构然后进行优化设计。带通滤光片的膜系^[6]为 Sub| HLHLH 2L HLHLH L HLHLH 2L HLHLH| Air,参考波长为 808 nm,其中 Sub 为 K9 基底,Air 表示空气,H 和 L 分别代表 Ti_3O_5 和 SiO_2 的 1/4 中心波长的光学厚度。理论光谱曲线如图 1 所示。

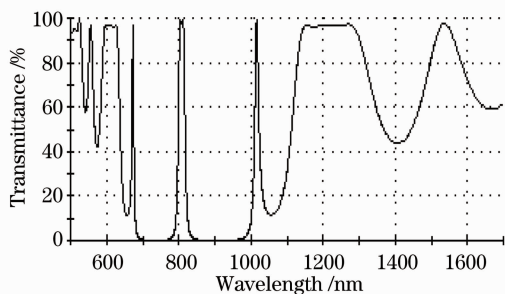


图 1 带通滤光片的理论光谱曲线

Fig. 1 Theoretical spectral curve of the band pass filter

由图 1 可知,除了 808 nm 之外其他波段均不符合要求。展宽截止带可采用叠加长波通或短波通膜堆的方法^[7],在带通滤光片的膜系基础上叠加膜堆,叠加后膜系的总层数为 73 层,膜层总厚度为 9.1 μm ,对部分膜层进行优化,使其满足 808 nm 窄带高透射、1550 nm 处也同时高透射,优化后发现当优化层数小于 46 层时,截止带次峰难以消除。在制

备方面,非规整膜系主要采用石英晶体监控法进行监控,石英晶体监控法有随着厚度增加,监控精度逐渐降低的缺点,所以当非规整膜层厚度较厚时,会造成监控累积误差过大,使制备的难度增加。综合考虑制备工艺,分别采取两个膜系进行设计与制备以减小膜厚及误差。

第一个膜系采用带通滤光片的膜系作为基础膜系,并借助 Macleod 膜系设计软件中的 Needle Synthesis 优化法对 808 nm 和 1550 nm 的设计要求进行优化设计,优化后的膜系为:Sub | 0.5081H 1.2378L H L H 2L H L H L H L H L H L H 2L H L H L H L H L H L H 1.384L 1.5653H 0.6596L 0.8889H 1.9617L 0.9793H 0.892L 1.0513H | Air。图 2 为第一个膜系的理论设计谱线。

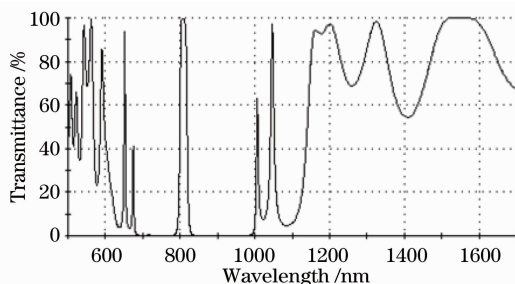


图 2 第一个膜系的理论设计谱线

Fig. 2 Theoretical spectral curve of the first film system

根据参数要求,还需对 600~700 nm 和 1000~1450 nm 两波段进行截止。双倍频反射膜能够在基频波长以及 1/2 基频波长处获得高反射,而所要求的截止带恰好符合双倍频反射膜的特征,所以第二个膜系采用双倍频反射膜的膜系 Sub | (2H L)⁹ (2.14H 1.07L)⁹ | Air 作为初始膜系,设计参考波长为 800 nm,借助 Macleod 膜系设计软件针对 600~700 nm,1000~1450 nm,808 nm 和 1550 nm 的要求进行优化设计,优化后的膜系为 Sub | 0.66H 0.753L 0.594H 0.507L H L 2H L H 2L H L H 0.298L H 0.429L H 2L H L 2H L H L 2H 1.04L 1.681H 1.196L 1.6H 1.6L 1.6H 1.6L 1.6H 1.6L

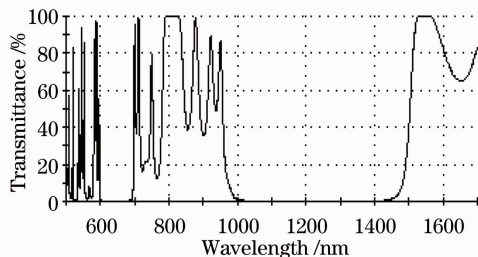


图 3 第二个膜系的理论光谱曲线

Fig. 3 Theoretical spectral curve of the second film system

1.6H 1.6L 1.6H 1.6L 1.968H 0.954L 1.528H
1.891L 1.923H 0.392L 2.297H | Air。图3为展宽截止带及实现高透射的理论设计谱线。

3 薄膜制备

镀膜设备采用惠州奥普康 OZZSQ-900 型真空镀膜机,该设备配有中国科学院空间中心的考夫曼离子辅助沉积系统,INFICON IC/5 石英晶体膜厚控制仪以及 Filmonitor BS2030 光学膜厚实时监控系。离子辅助沉积系统能够用反应气体的粒子束对基片进行轰击,使沉积粒子获得较大的动能,提高膜料粒子的迁移率,增强膜层与基底之间的附着力。IC/5 石英晶体膜厚控制仪配有 2 个探头。Filmonitor BS2030 光学膜厚实时监控系采用透射式监控,监控范围为 400~1000 nm。

选择合适的工艺参数有利于提高薄膜的致密性,增强滤光片的稳定性。聚集密度通常随着温度的增大而增大,在一定范围内增大离子源束流,也可提高薄膜的聚集密度。经过多次实验,选择基片温度为 310 ℃,离子源的屏极电压为 420 V,离子束流为 60 mA。

采用无水乙醇和无水乙醚体积比为 3:1 的混合溶液对基片进行清洗,然后将基片放到工件盘上抽真空,打开烘烤使衬底温度达到 310 ℃,当真空度达到 2.0×10^{-3} Pa 时,打开考夫曼离子源将基片清洗 20 min,经实验得出光控 tooling 值为 119%,光控监控波长为 678 nm,然后开始蒸镀。

4 测试结果与分析

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计进行测试,测试曲线如图 4 所示。可以看出,808 nm 处往短波漂移 10 nm 且透射率偏低,经分析,光谱曲线的变化主要是由于膜厚监控误差和材料的折射率变化等因素造成的。在相同的工艺条件下经过多次反复实验,光谱曲线仍然不理想,故使用膜系设计软件重新

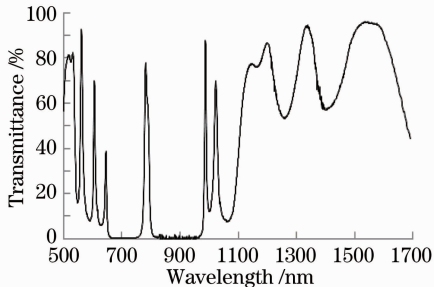


图 4 第一个膜系光谱曲线测试图

Fig. 4 Measured transmittance curve of the first film system

模拟分析,如图 5 所示。

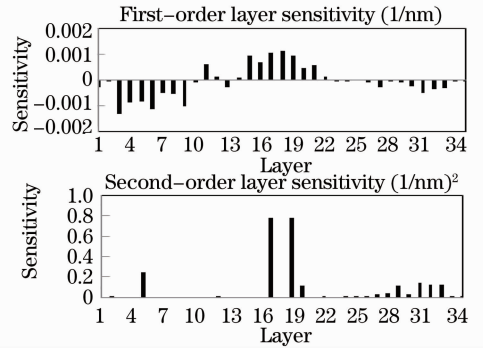


图 5 第一个膜系的膜层敏感度分布图

Fig. 5 Layer sensitivity distribution of the first film system

由图 5 可以看出,第 17 和 19 层相比其他膜层敏感度较高,经模拟,膜厚变化 1% 时,808 nm 透射率变化 2%。第 17 和 19 层为规整膜层,在制备的过程中主要采用光学极值法监控,光控极值法监控是人为判停,会存在一定的误差,为了降低这两层的膜层敏感度,考虑采用遗传算法对非规整膜层重新优化。遗传算法通过计算适应度函数最大值来得出所需要的解^[8]。膜系的评价函数为

$$f = \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |T_j^p - T_j| \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 m 为优化目标的数量, T_j 和 T_j^p 分别为第 j 个优化目标的当前光谱曲线透射率和目标透射率。当膜厚发生随机改变时,评价函数的改变量具有随机性,通过多次计算,求出评价函数改变量的数学期望,并定义为膜层的敏感度,表示为

$$S = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f_k - f), \quad (2)$$

式中 f_k 表示膜层厚度发生随机改变后的评价函数值。假定新的评价函数 Q 为与 f 和 S 相关的复合函数:

$$Q = \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |T_j^p - T_j| \right]^{1/2} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f_k - f). \quad (3)$$

当 Q 取最小值时,表示最终计算出的结果为满足设计要求且膜层敏感度较低的膜系。基于遗传算法计算适应度函数最大值的原则,对函数 Q 进行改进:由于 T_j^p 和 T_j 均为小于 1 的实数,那么 $f_{\max} < 1$ 。从而可确定 $S_{\max} < 1$, $Q = f + S < 2$,那么 $2 - Q$ 恒为正,且极大值为 2,可作为适应度函数,表示为

$$F = 2 - f - S =$$

$$2 - \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |T_j^p - T_j| \right]^{1/2} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (f_k - f). \quad (4)$$

将上述适应度函数代入 MATLAB 软件的遗传算法工具箱中,将膜系非规则膜层层数 10 设置为变量的个数,每层的几何厚度均限制为 20~1000 nm,使程序根据目标值自动优化,逐步找出适应度函数 F 的极大值,此时表明新的评价函数 Q 取得最小

值。采用遗传算法对之前设计的两个膜系重新进行优化,第一个膜系优化后为: Sub | 0.5247H 1.2343L (HL) ^ s 1.4801L 1.4517H 0.6971L 0.7358H 2.1255L 0.8627H 0.8889L 1.1092H | Air,优化后的膜层敏感度分布如图 6 所示。

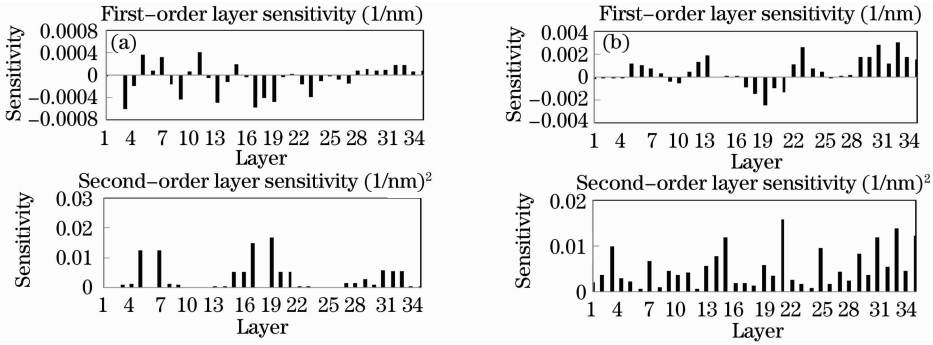


图 6 降低敏感度后膜层敏感度分布图。(a)第一个膜系; (b)第二个膜系

Fig. 6 Layer sensitivity distribution after decreasing the sensitivity. (a) First film system; (b) second film system

由图 5 和图 6(a)可知,第 17 层的敏感度从 0.77955降为 0.01475,第 19 层的敏感度从 0.77909降为 0.01661,且膜层敏感度整体降低。对曲线进行重新模拟发现,当第 17 和 19 层膜厚变化 1%时,808 nm 透射率变化 0.3%,变化幅度比之前有了明

显的降低,这表明采用遗传算法对膜系的优化有着非常明显的作用,在保证设计效果的同时能够有效地降低制备难度。在同样的工艺条件下继续进行试验,得到的测试曲线如图 7(a)和(b)所示。

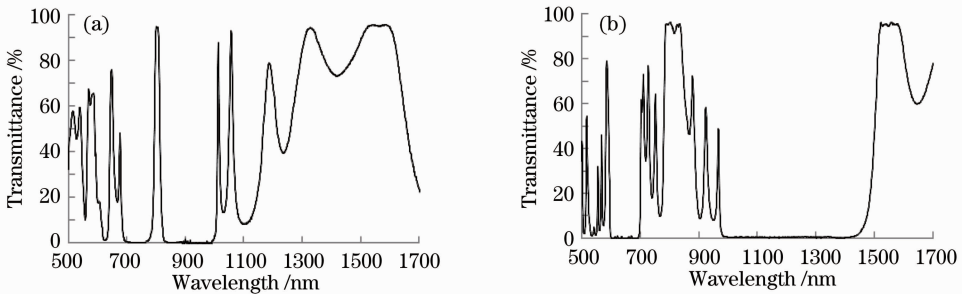


图 7 降低敏感度后的测试光谱曲线图。(a)第一个膜系; (b)第二个膜系

Fig. 7 Measures transmittance curves after decreasing the sensitivity. (a) First film system; (b) second film system

由图 8 可知,808 nm 透射率为 98.33%,半峰全宽为 14 nm,600~790 nm 和 830~1450 nm 平均透射率为 0.146%,1550 nm 处透射率为 99.17%,满

足激光通信的使用要求。

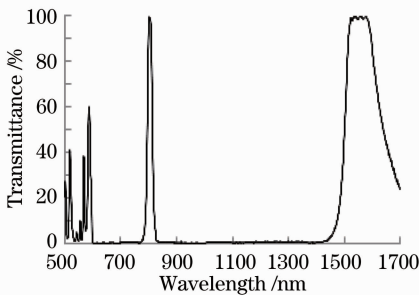


图 8 两膜系叠加后光谱测试曲线

Fig. 8 Measured transmittance curve with the two film systems superimposed

5 环境测试

1) 附着力测试:用高温胶带紧贴膜层表面,沿薄膜的垂直方向拉起,重复 20 次,无脱膜以及划伤现象。

2) 湿度测试:将基片放置在相对湿度为 95% 的常温环境下 24 h,膜层无明显变化。

3) 高温测试:将基片在 300 °C 的高温下烘烤 2 h,膜层无明显变化。

将环境测试后的基片重新进行测试,基片的光谱曲线无变化,满足使用要求。

6 结 论

采用电子束真空蒸镀制备临近空间激光通信滤光膜。采用分步设计法,先在带通滤光片的基础上保证 808 nm 和 1550 nm 两波段的高透射,再选择另一膜系对截止带进行展宽。根据测试分析,采用遗传算法,通过对非周期膜层进行重新优化,解决了光控部分膜层敏感度较高的问题。

虽然制备的滤光膜满足使用要求,但仍与理论设计有一定差距,如何进一步提高 808 nm 和 1550 nm 处的透射率成为今后的研究方向。

参 考 文 献

- 1 Fan Zhengxiu. Development and recent progress of optical thin films[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900131.
范正修. 光学薄膜及其进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900131.
- 2 Ouyang Xiangjing, Chen Shuxin. Research on communication of near space platform and its military application[J]. Fire Control & Command, 2012, 37(2): 163-164.
欧阳向京, 陈树新. 临近空间通信平台及其军事应用[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(2): 163-164.
- 3 Cai Yuan, Liu Dingquan, Luo Haihan. Design and fabrication of 3.5~4.0 μm band-pass filter cryogenic temperature[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0107001.

- 蔡 渊, 刘定权, 罗海瀚. 3.5~4.0 μm 低温光谱带通滤光片的设计与研制[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0107001.
- 4 Geng Siyu, Fu Xiuhua, Tan Zhi, *et al.*. Design and manufacture of day-and-night double sensitive infrared filter film[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 903-905.
耿似玉, 付秀华, 谭 志, 等. 双通感红外日夜两用型滤光膜的研制[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 903-905.
- 5 Fu Xiuhua, Kou Leilei, Zhang Jing, *et al.*. Fabrication of optical filter film for visible and near-infrared laser communication system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1207001.
付秀华, 寇雷雷, 张 静, 等. 可见与近红外激光通信系统光学滤光膜的研制[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1207001.
- 6 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 140-152.
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: 140-152.
- 7 Zhang Baisen, Ma Mianjun, Xiong Yuqing. Design and preparation of infrared pass-band filters with wide rejection band for space use[J]. Infrared, 2009, 30(2): 15-19.
张佰森, 马勉军, 熊玉卿. 空间用宽截止长波红外带通滤光片的设计与镀膜[J]. 红外, 2009, 30(2): 15-19.
- 8 Yu Wenbing, Lü Pin. Optimal design on the film system of a narrow-band filter by the genetic algorithm [J]. J Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2004, 26(5): 32-34.
于文兵, 吕 品. 基于遗传算法的窄带滤光片膜系最佳设计[J]. 武汉理工大学学报·信息与管理工程版, 2004, 26(5): 32-34.

栏目编辑: 韩 峰