

doi: 10.3788/gzxb20124103.0303

卫星激光通信滤光膜的研制

张静, 付秀华, 潘永刚

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要:为满足卫星激光通信中超高速数据传输的特殊要求,采用电子束和离子辅助沉积技术,制备了 532 nm、632 nm 和 1 064 nm 波长处高反射,808 nm 和 1 550 nm 处高透射的多波段滤光膜。选取了 H_4 和 SiO_2 作为高低折射率材料,通过对膜系设计曲线的不断优化,减少了灵敏层的个数,得到了相对易于制备的膜系结构;采用电子束加热蒸发方法并加以离子辅助沉积系统制备薄膜,采用光控与晶控同时监控的方法控制膜厚;通过不断调整工艺,提高了薄膜的抗激光损伤能力,减小了膜厚控制误差,提高了透射波段的透过率及反射波段的反射率,最终得到了光谱性能较好的滤光膜。该薄膜能够承受雨淋、盐雾、高低温等环境测试,满足使用要求。

关键词:卫星激光通信;电子束加热蒸发;离子辅助沉积;激光损伤阈值;膜系设计

中图分类号: O484

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)03-0303-4

0 引言

卫星激光通信是以激光为传输媒介,在卫星之间建立光通信链路,实现数据传输的技术^[1]。卫星激光通信具有巨大的潜在应用价值,它已成为现代通信技术发展的新热点,国际上已实现高码率、小型化、轻量化和低功耗激光通信终端^[2]。卫星激光通信技术研究已经完成单元技术的研究,短距离固定点的激光通信已经有了较成熟的产品。目前较为领先的是日本、美国和欧洲。

由于受到光传输介质及探测器的影响,国内外对于 532 nm、808 nm、1 064 nm 和 1 550 nm 四个波长的滤光膜做了多方面的研究,但是对于波长 632 nm 且同时覆盖这五个波长的研究比较少见。本文针对这五个波长研究了多波段滤光膜,其难点在于膜系的设计,由于多个波长的高反射和高透过,给设计带来很大的困难。另外,改进监控方法和优化工艺参量,提高膜厚控制准确度也是要解决的关键问题。

1 膜系的设计

1.1 膜料的选择

由于工作波长涵盖了可见和近红外区的激光波长和光通信波长,所以在选择膜料时,材料在可见和近红外区要具有透明性,并具有较强的抗激光损伤能力。

TiO_2 是常见的高折射率镀膜材料,但其材料本身不稳定,易失氧,容易有吸收。 H_4 是一种新兴的复合氧化物材料,是氧化钛和氧化镧两种材料混合而成,主要成分为 $LaTiO_3$ 。 H_4 的折射率和基底温度有关:当 $\lambda = 550 \text{ nm}$, $T = 100^\circ\text{C}$ 时, $n = 2.08$; 当 $\lambda = 550 \text{ nm}$, $T = 300^\circ\text{C}$ 时, $n = 2.11$ 。该膜料光学性能稳定,不易与其他物质发生反应,容易蒸镀而且吸收很小,抗激光损伤能力比 TiO_2 高^[3]。沉积过程中受氧气压力影响小,工艺重复性好,其透明区较宽,为 360~7 000 nm,应用比较广泛^[4]。综上所述,最终选择 H_4 作为高折射率材料。

SiO_2 是一种分解很小的低折射率氧化物材料,具有膜层牢固,耐磨,抗腐蚀的特性,同时具有低吸收和高的抗激光损伤能力^[5],所以选择 SiO_2 作为低折射率材料。

1.2 膜系设计

根据膜系设计的要求:532 nm、632 nm 和 1 064 nm 波长处高反射,808 nm 和 1 550 nm 处高透射,在膜系设计的同时还要综合考虑镀膜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。

为了减少厚度累积误差,膜系设计应考虑总厚度不能太厚,总层数不宜过多,同时单层膜不宜偏厚,以免造成应力过大产生膜层龟裂、脱膜等,若单层膜太薄的话,也不容易控制^[6]。

初始膜系选择高反膜的基本膜系 $Sub|(HL)^{23}$

基金项目:省部产学研结合项目(No. 2010A090200006)资助

第一作者:张静(1984-),女,助教,硕士,主要研究方向为光学薄膜。Email: zhangjing840225@163.com

导师(通讯作者):付秀华(1963-),女,教授,主要研究方向为光学薄膜和光学工艺。Email: goptics@126.com

收稿日期:2011-10-19;修回日期:2011-12-25

H | Air, H 和 L 分别代表高折射率材料 H_4 和低折射率材料 SiO_2 . 在膜系的最后加上一层光学厚度为 $\lambda/2$ 的 SiO_2 保护膜层, 这样并不影响膜系的透过率, 反而提高了薄膜的抗激光损伤能力^[7].

利用 TFC 膜系设计软件进行优化, 如果膜系结构全是非周期的, 需要用晶控系统控制膜厚, 由于滤光膜较厚, 只用晶控控制厚度, 累计误差太大, 所以选择光控和晶控结合的方法进行控制, 修改膜系, 只对基底和空气侧的匹配层进行优化, 优化后膜系为 Sub | 0.32H 1.57L 1.45H 0.29L 1.40H 1.48L 0.52H 0.59L 1.44H 0.45L 1.51H 0.50L 1.54H 0.57L 2.69H 1.68L 0.47H 1.35L 0.52H 0.82L (HL)⁶ 0.63H 1.59L 0.63H 0.68L 2.14H 0.23L 0.47H 0.78L 1.25H 0.65L 1.55H 1.41L 1.32H 0.59L 1.25H 2L | Air, 图 1 为膜系设计曲线及各层膜厚度对光谱曲线影响的敏感度.

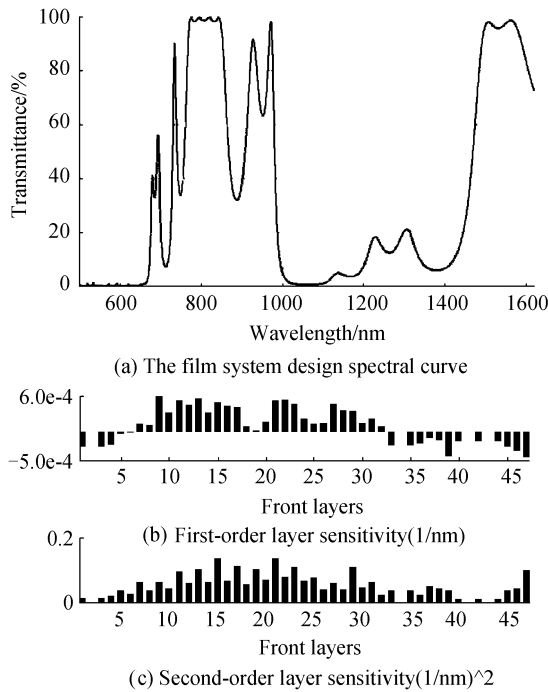


图 1 只对基底和空气侧的匹配层优化后得到的膜系设计曲线及膜层相对灵敏度
Fig. 1 The film system design spectral curve and relative sensitivity of the optimized matching layer of the substrate and the air side

从图 1 可以看出, 灵敏度为正值的膜层较多, 正值表示评价函数随着膜层厚度的变化而增大, 负值表示评价函数随着膜层厚度的变化而减小, 透射区波段的波纹也较多, 给膜系的制备造成了极大的困难, 厚度不易监控. 考虑到既要满足设计要求, 又要兼顾制备要求, 对膜系的结构再次进行优化, 对敏感层进行修正, 得到如下膜系: Sub | 0.29H 1.57L 0.98H 0.29L 1.05H 1.23L 0.65H 0.59L 1.32H 0.45L 1.51H 0.43L 1.38H 0.56L 1.67H 0.64L

1.37H 0.67L 1.44H 0.72L (HL)⁶ 0.57H 1.48L 0.69H 0.58L 2.14H 0.23L 0.37H 0.78L 1.35H 0.62L 1.46H 0.51L 1.41H 0.55L 1.31H 2L | Air, 光谱曲线和各层膜厚度对光谱曲线影响的敏感度如图 2.

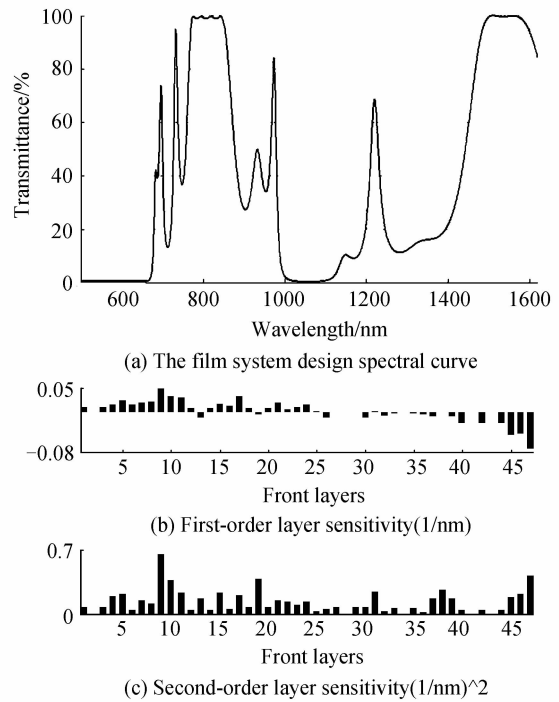


图 2 对基底、空气侧的匹配层和第三层优化后的光谱曲线以及膜层相对灵敏度
Fig. 2 The spectral curve and relative sensitivity of the optimized sensitive layer and the matching layer of the substrate and the air side

从图 2(a) 可以看出, 透射带的曲线更平滑, 透过率更高, 满足设计要求. 图 2(b)、(c) 中灵敏度为负值的层数较图 1(a)、(b) 中的多, 所以灵敏度比图 1(a)、(b) 的好一些.

由于基底背面存在反射损失, 为了提高透射波段的透过率, 需要在基底背面镀制 808 nm 和 1 550 nm 处的减反射膜, 设计膜系如下: Sub | 1.34H 1.26L 1.04H 3.43L | Air, H 和 L 分别代表高折射率材料 H_4 和低折射率材料 SiO_2 , 图 3 为减反射膜的设计光谱曲线.

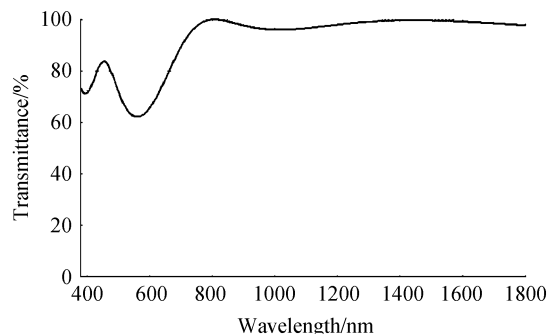


图 3 减反射膜光谱曲线
Fig. 3 The relative sensitivity of film

2 制备工艺

实验使用 OPCO 惠州奥普康真空科技有限公司的镀膜机,此设备采用 GM-X07 光学膜厚控制仪,使用下反射式光路,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 SQC-310 晶控系统控制,该晶控仪配备了 2 个石英探头,可自动切换.设备配置的离子源是中科院空间中心的考夫曼离子源,离子源的主要作用是活化基底表面分子,增加膜层的附着力,提高膜层的机械强度和化学稳定性,从而提高材料的折射率^[8].

首先对基片进行清洗,用乙醇乙醚混合液擦拭后放在工件架上抽真空,打开工件转动和烘烤,烘烤温度为 250℃.当真空度达到 3×10^{-3} Pa 时打开离子源,控制充入的氧气流量使真空室的压强保持在 1×10^{-2} Pa 左右,轰击 10 min 后,打开电子枪进行蒸镀.

选择合适的沉积速率有利于提高薄膜的致密性和折射率,但从抗激光损伤角度来看,速率越小,材料的相对吸收越小,抗激光损伤能力越强,综合考虑,最终选择 H_4 的蒸发速率为 0.3 nm/s, SiO_2 的蒸发速率为 0.7 nm/s.

为改善膜层强度,提高薄膜的抗激光损伤能力,将镀膜后的样品直接在镀膜室中进行真空退火处理^[9],温度升到 300℃ 恒温 1 h,然后自然冷却.

3 测试结果及分析

利用日本岛津 UV-3150 分光光度计对两面镀制后的样品进行测试,测试曲线如图 4.

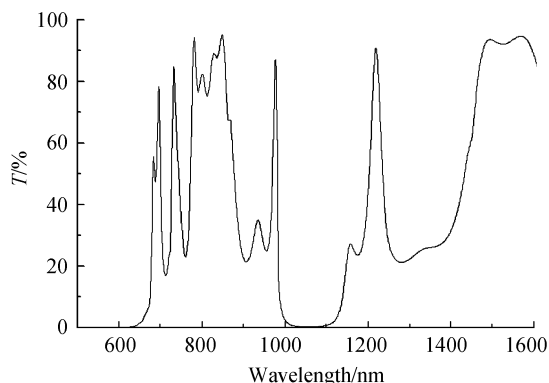


图 4 膜系修改前实测透过率曲线

Fig. 4 The measured transmittance curve before the modified film system

由图 4 可以看出,曲线在 808 nm 处透过率较低,并且在 780~830 nm 处有很多波纹,1 550 nm 处透过率也偏低,这是由于此膜系薄膜的层数较多,镀膜过程中膜厚控制误差积累以及镀膜材料的折射率非均匀性和色散造成的.利用软件模拟分析, H_4

的整体厚度偏少,修改 H_4 的晶控 Tooling Factor 值来调整 H_4 的厚度,根据材料的折射率非均匀性和色散结果对膜系细微修改,同时为了减少膜厚控制误差,采用光控控制周期膜层和灵敏度较大的膜层厚度,用晶控控制非周期膜层厚度,继续进行实验.调整后的实验测试曲线如图 5.

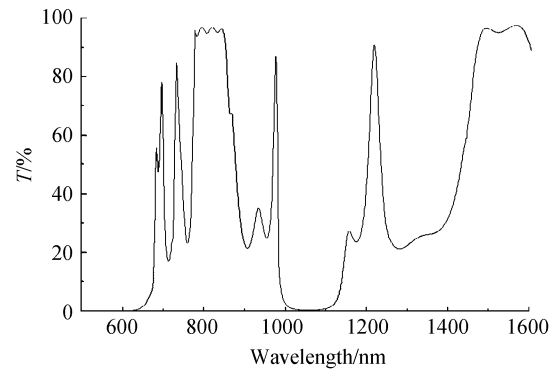


图 5 膜系修改后实测透过率曲线

Fig. 5 The measured transmittance curve after the modified film system

由图 5 可以看出,532 nm 处反射率为 99.5%,632 nm 处反射率为 99.6%,808 nm 处透过率为 95%,1 064 nm 处反射率为 99.6%,1 550 nm 处透过率为 96.7%,808 nm 和 1 550 nm 处透过率有明显提高,满足设计要求.

4 环境测试

1)附着力测试:用脱脂棉球蘸酒精轻擦膜层表面,如果不掉膜就加大力度重擦表面,如果依然牢固用宽 3 cm 普通胶带粘住镀膜表面,然后沿膜面垂直方向迅速拉起,重复 10 次,未有脱膜现象.

2)高低温测试:在 70℃~ -40℃ 温度,测试 10 个温度循环后,膜未有脱落.

3)湿度测试:在相对湿度为 95%,温度为 65℃ 条件下,放置 15 h 后,膜层未有明显变化.

4)耐雨淋性能测试:雨水直径 0.5~4.5 mm,试验时间 40 min,膜层表面无明显变化.

5)耐盐雾性能测试:在质量分数为 4.9%~5.1%. pH 值为 6.5~7.2(35℃)的盐雾中承受连续喷雾 24 h,膜层表面无明显变化.

6)抗激光测试:用输出波长为 1 064 nm 的 Nd:YAG 激光系统测试,脉冲宽度 12 ns,脉冲重复频率 1 Hz,光斑面积 1 mm²,采用 1-on-1 的方式进行损伤阈值测试,测试结果为 12.7 J/cm².

上述测试完成后再次测试样品的透过率光谱,曲线基本没有变化.

5 结论

通过选择 H_4 和 SiO_2 两种抗激光损伤阈值较

高的镀膜材料,采用电子束真空镀膜的方法,制备了卫星激光通信滤光膜.在制备过程中,采用离子辅助沉积和退火的方法提高了薄膜的抗激光损伤能力.通过调整镀膜工艺参量和监控方法,减少了膜厚控制误差.

虽然制备的滤光膜满足使用要求,但仍达不到理论设计的要求,所以提高 808 nm 和 1 550 nm 波长处的透过率,同时进一步提高薄膜的控制准确度和抗激光损伤能力成为今后研究和改进的方向.

参考文献

- [1] XU Xiang, WANG Ping. Key technology of satellite laser communication[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, **3**(28): 87-89.
徐香,王平.卫星激光通信的关键技术[J].舰船电子工程,2008,**3**(28):87-89.
- [2] LIU Li-ren. Satellite laser communication I link and terminal technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(1): 3-6.
刘立人.卫星激光通信 I 链路和终端技术[J].中国激光,2007,**34**(1):3-6.
- [3] WEI Zi-xun, FU Xiu-hua. Fabrication of broadband AR coating for three-dimensional laparoscopic facet[J]. *Chinese Optics*, 2011, **4**(2): 196-200.
魏孜询,付秀华.三维腹腔镜端面宽带增透膜的研制[J].中国光学,2011,**4**(2):196-200.
- [4] LIU Chun-ling, WANG Chun-wu, WANG Guang-de. Electron beam physical vapor deposition H4 film technology and its application on 808nm laser cavity mask[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(12): 3141-3143.
刘春玲,王春武,王广德.电子束蒸镀 H₄ 膜工艺及其在 808 nm 激光器腔面膜上的应用[J].中国激光,2010,**37**(12): 3141-3143.
- [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,2006:239-242.
- [6] HE Cai-mei, FU Xiu-hua, SUN Yu-lin, et al. Study and fabrication of multi-band laser filter film[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(6): 1550-1553.
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):1550-1553.
- [7] LIU Qiang, LIN Li-bin. Study on improving damage threshold of dielectric films[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(7): 637-641.
刘强,林理彬.提高氧化物介质膜层损伤阈值[J].中国激光,2003,**30**(7):637-641.
- [8] ZHANG Da-wei, HE Hong-bo, SHAO Jian-da, 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.
- [9] JIANG Xiao-dong, HUANG Zu-xin, REN Huan, et al. Study of laser conditioning process for optical films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3): 321-324.
蒋晓东,黄祖鑫,任寰,等.光学膜层激光预处理过程研究[J].强激光与粒子束,2002,**14**(3):321-324.

Design and Fabrication of Satellite Laser Communication Filter Coating

ZHANG Jing, FU Xiu-hua, PAN Yong-gang

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to satisfy the special requirements of super velocity data transmission in satellite laser communication, a type of multi-band filter membrane with high reflection at 532 nm, 632 nm, 1 064 nm wavelengths and high transmission at 808 nm, 1 550 nm wavelengths is prepared, adopting electronic beaming vacuum depositing method with the aid of ion assistant deposition technology. By selecting H₄ and SiO₂ as the high and low refractive index materials, continually optimizing the film system design curve, reducing the number of sensitive layers, the film structure is obtained that is easily prepared. The thin films are prepared through electron beam heating evaporation and ion assisted deposition system, and the film thickness is controlled using crystal-controlled and light control monitoring methods at the same time. By continually adjusting the process, the film laser damage resistance ability is improved, the control error is reduced, the transmittance of the transmission band and the reflectance of the reflection band are increased, and the filter membrane with better spectral performance is obtained. The experimental results show that the filter membrane can withstand rain, salt spray, high and low temperature and other environments, and meet the requirements in satellite laser communication.

Key words: Satellite laser communication; Electronic beaming vacuum depositing; The aid of ion assistant deposition; High laser damage threshold; Film system design