

589 nm 激光器光路整合系统滤光膜的研制

付秀华 黄金龙 莫朝燕 王 煜

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为了提高黄光激光器的信噪比,采用 Ta_2O_5 和 SiO_2 作为高低折射率材料,通过电子枪蒸发及离子辅助沉积技术,利用制备的 589、1064、1178、1342 nm 波长处分别有特定透射率的干涉截止滤光片对无用光信号进行过滤。在实际镀制过程中,由于沉积工艺条件不同,导致材料折射率的不稳定。另外监控方法易引起误差。通过调整优化工艺参数并调整膜系,有效控制膜厚监控精度,提高了对应波长的光学性能。经过高温、潮湿等恶劣环境测试,该滤光片满足黄光激光器的使用要求。

关键词 薄膜;干涉截止滤光片;膜系设计;监控误差;黄光激光器

中图分类号 O484 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0307001

Design and Fabrication of 589 nm Laser Optical Path Integration System Filter Film

Fu Xiuhua Huang Jinlong Mo Zhaoyan Wang Yu

(College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract To improve the signal-to-noise ratio and filter the useless signal, Ta_2O_5 and SiO_2 are chosen as the film materials. Electron gun and ion-assisted deposition system are used for film preparation. The interference cut-off filter films which have specific transmittance at 589, 1064, 1178, 1342 nm are deposited. In the actual coating process, the refractive indexes of materials are not stable in different conditions. In addition, the monitoring method lead to the errors. Optimizing the parameters and designing the film system can effectively control film thickness monitoring accuracy. Therefore, the optical properties corresponding to the wavelengths are enhanced. The experimental results show that the filter film can withstand high temperature, wet and other environments, completely meeting the demands of yellow laser.

Key words thin films; interference cut-off filter film; film system design; monitoring error; yellow laser

OCIS codes 310.1620; 310.1860; 310.6860

1 引 言

在生物工程、国防科技、医疗手术、激光治疗和激光显示等领域中,黄光激光器都有着广泛的应用^[1]。优良的激光器元件不仅能增加激光透射率,而且能消除激光器可能产生的杂散光,因此元件滤光膜的研制变得愈加重要。为了使黄光激光器达到最佳的和频输出,还应严格控制 1064 nm 激光的透射率,而这种控制的精确实现是非常困难的,需要通过不断地实验改进等,才能达到透射率的最佳取值。

目前,国内外对于多波段可见近红外滤光膜都有了较多研究^[2~5],但是对特定波长具有特定透射率的滤光膜还未见报道。

本文通过对材料的分析,设计优化膜系,重点解决了滤光膜由于监控误差导致的膜层厚度不匹配,膜层光学性能不好的问题。

2 膜系设计

根据激光器对光学元件的使用要求,其透射率

收稿日期: 2012-09-07; 收到修改稿日期: 2012-11-07

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20086012)资助课题。

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

T 和反射率 R 的取值应满足:在 589 nm 处, $T \geq 96\%$; 在 1064 nm 处, $T \geq 84\%$; 在 1178 nm 处, $R > 99\%$; 在 1342 nm 处, $T > 96\%$ 。

2.1 膜材料的选择

在 500~1400 nm 区间满足透明区要求的常用高折射率材料主要有 TiO_2 和 Ta_2O_5 等,低折射率材料有 SiO_2 和 MgF_2 等。

TiO_2 在电子枪蒸发的过程中根据充氧量的多少可能会产生多种 Ti 的氧化物,使得折射率分布不稳定,在镀制多层膜时无法精准地控制膜料的折射率,并且 TiO_2 比 Ta_2O_5 激光损伤阈值低,不适合作

为激光器光学元件上的薄膜材料。 Ta_2O_5 的折射率较稳定,且激光损伤阈值较高^[6],故选用 Ta_2O_5 作为高折射率材料。

作为低折射率材料, MgF_2 在形成薄膜时的张应力较大,特别是在镀制多层膜时容易造成薄膜的龟裂。而 SiO_2 能与 Ta_2O_5 有良好的匹配,并且膜层稳定,因此选用 SiO_2 作为低折射率材料。

2.2 膜系设计

对 Ta_2O_5 进行镀制发现,不同参数条件下 Ta_2O_5 的折射率如表 1 所示。

表 1 不同条件下 Ta_2O_5 和 SiO_2 的折射率

Table 1 Refractive indexes of Ta_2O_5 and SiO_2 under different conditions

Vacuum / 10^{-3} Pa	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Refractive index(Ta_2O_5)		Refractive index(SiO_2)	
3.0	200	2.072(0.55 μm)	1.961(1.5 μm)	1.454(0.55 μm)	1.433(1.5 μm)
2.2	200	2.078(0.55 μm)	1.966(1.5 μm)	1.455(0.55 μm)	1.433(1.5 μm)
3.0	290	2.081(0.55 μm)	1.970(1.5 μm)	1.460(0.55 μm)	1.443(1.5 μm)
2.2	290	2.104(0.55 μm)	1.976(1.5 μm)	1.464(0.55 μm)	1.448(1.5 μm)

由表 1 可知, SiO_2 在不同温度和真空度下,与 Ta_2O_5 相比折射率的变化较小。当衬底温度为 290 $^{\circ}\text{C}$,基底真空为 2.2×10^{-3} Pa 时, Ta_2O_5 的折射率最高,有利于在膜系设计时有效减小膜层总厚度。

在 K9 玻璃基底上设计滤光膜,由于光谱曲线透射率分布与高反膜系相近^[7],因此设计的中心波长为 1170 nm。由于实验设备的光学监控范围为 400~800 nm,因此采用双倍控制的方法,参考波长为 580 nm,初始膜系为 $\text{Sub} | (2\text{H}2\text{L}) \cdot 18 \text{H} | \text{Air}$ 。其中符号 H 和 L 分别代表 Ta_2O_5 和 SiO_2 的 $\lambda/4$ 光学厚度,Sub 表示 K9 基底,Air 表示入射介质为空气。经过 Macleod 膜系设计软件优化,优化后的膜系为 $\text{Sub} | 1.86\text{H} \ 3.51\text{L} \ 0.79\text{H} \ 2.03\text{L} \ 0.91\text{H} \ 1.86\text{L} \ 4\text{H} \ 2\text{L} \ 2\text{H} \ 2\text{L} \ 2\text{H} \ 2\text{L} \ 2\text{H} \ 0.25\text{L} \ 2.35\text{H} \ 0.2\text{L} \ 2\text{H} \ 2\text{L} \ 2\text{H} \ 2\text{L} \ 2\text{H} \ 2\text{L} \ 2\text{H} \ 0.25\text{L} \ 5.89\text{H} \ 0.4\text{L} \ 2.26\text{H} | \text{Air}$ 。由于石英晶体控制精度大约为 2%,而光学极值法控制精度能达到千分量级,为了提高控制精度,对规整膜系尽量采用光学监控。1 至 6 层,14 至 16 层,24 至 27 层均为非规整膜系,采用石英晶体控制进行监控。7 至 13 层,17 至 23 层为规整膜系,采用光学极值控制进行监控^[8]。

由于采用双倍控制,当有效光学厚度等于半波长或半波长整数倍时,在参考波长处对薄膜系统的特性没有影响,因此在镀制 2L 层时,就相当于在 K9 基底上镀制 SiO_2 ,由于 K9 基底的折射率与 SiO_2 相近,会增大膜厚控制误差。因此将第 7 层分

两个光控片监控,1 号光控片沉积 $3\lambda/4$ 膜层厚度,2 号光控片沉积 $\lambda/4$ 膜层厚度,在此基础上沉积 L 层,可以提高 L 层的膜厚控制精度。同理,第 17 层也采用同样的方式。其要求波段范围的设计理论光谱曲线如图 1 所示。

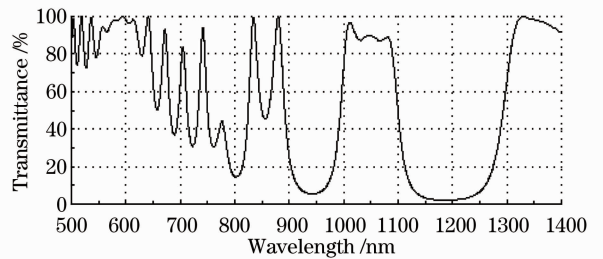


图 1 理论设计光谱透射率曲线

Fig. 1 Transmittance curve of theoretical design spectrum

为了提高透射率,在光学元件另一面镀制 589、1064、1342 nm 的增透膜,通过膜系设计软件,采用 Ta_2O_5 和 SiO_2 作为高低折射率材料,参考波长为

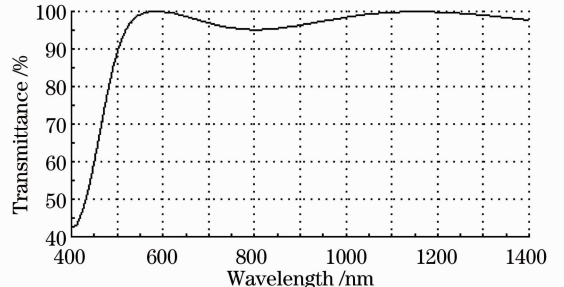


图 2 背面设计光谱曲线

Fig. 2 Curve of back design spectrum

550 nm,膜系为 Sub|0.36H 0.42L 1.19H 0.56L 0.54H 1.66L|Air。其在 400~1400 nm 之间理论光谱曲线如图 2 所示。

3 薄膜制备

薄膜制备是在国产 900 型全自动真空镀膜机上进行的,该设备配有双电子枪和考夫曼离子源辅助淀积系统,还配有双探头的 SQC-310 型晶控仪以及 Filmonitor BS2030 型在线监控系统。考夫曼离子源能够对基片进行清洗,去除在基片上出现的二次污染,并能为膜料原子或离子提供动能,从而提高成膜密度,有效地改善膜层质量^[9]。通过在线监控系统的监控,可对光谱曲线进行控制。

在薄膜镀制开始前,首先用质量分数大于 99.7% 的无水乙醇和纯度大于 99.5% 的乙醚溶液进行 3:1 混合后对基片进行清洗,擦拭后放在工件架上抽真空,当真空度达到 8.0×10^{-2} Pa 时对工件进行烘烤加热,温度达到 290 °C 时恒温 30 min,当真空度达到 2.2×10^{-3} Pa 时,打开考夫曼离子源调整参数对基片轰击 20 min,然后进行蒸镀。

4 测试结果及分析

采用日本岛津 UV-3150 型分光光度计对实验样品进行检测,测试曲线如图 3 所示。

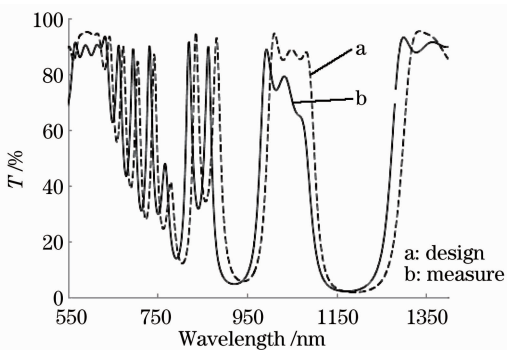


图 3 设计光谱曲线与测试光谱曲线对比图
Fig. 3 Comparison of design spectral curve and measure spectral curve

由图 3 可知,在 589 nm 和 1342 nm 处透射率均下降 5%,1064 nm 处透射率下降 20%。对曲线进行模拟分析,发现采用光学法监控时的膜厚误差对 589,1064,1342 nm 处透射率影响较大。利用软件对测试结果进行模拟,发现误差产生的主要原因有以下两点:1) 直接镀制在 K9 基底的 Ta_2O_5 与镀制在 SiO_2 膜层上的 Ta_2O_5 虽然光控显示都是 $\lambda/4$,但是实际测试其厚度关系为 1:0.87;2) 当 Ta_2O_5

和 SiO_2 的监控波长同为 580 nm 时,除了直接沉积在 K9 玻璃上的 Ta_2O_5 之外,其余膜厚实际比例为 1:1.16。

将上述分析的结果代入膜系中,进一步对膜系优化,其结果为 Sub|2.38L 2.35H 2.92L 2.18H 1.88L 0.56H 0.77L 0.61H 0.3L 4H 2.23L 1.75H 2.23L 1.75H 2.23L 3.5H 0.25L 0.89H 0.31L 2H 2.23L 1.75H 2.23L 1.75H 2.23L 1.75H 0.25L 0.65H 0.4L 1.7H 0.77L 1.42H 1.57L 1.63H|Air。利用软件对膜系进行敏感度分析^[10],分析结果如图 4 所示。

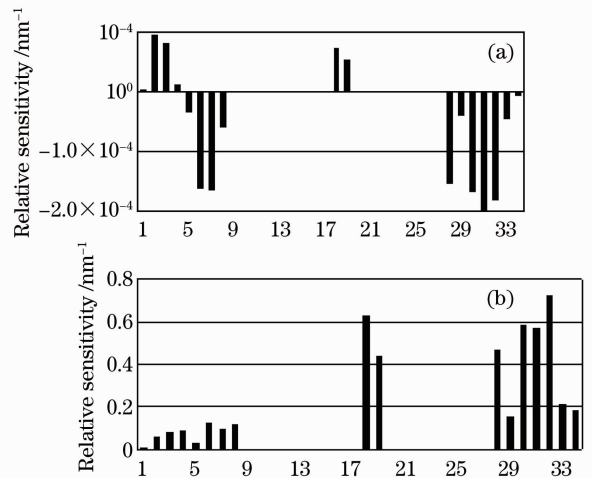


图 4 (a)一阶与(b)二阶膜层灵敏度分布

Fig. 4 Layer sensitivity distribution of (a) first-order and (b) second-order layer

由图 4 可以看出,第 18,30,31,32 层的敏感度较高,为了减少膜厚控制误差,在沉积这 4 层膜时采用另一个监控探头进行单独监控,再次测得结果如图 5 所示。

由图 5 可知,此时 589 nm 与 1342 nm 处透射率为 92%,满足光谱曲线要求,但在 1040~1080 nm

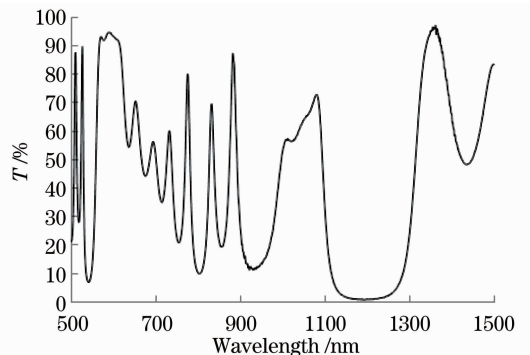


图 5 光控修改后测试曲线图

Fig. 5 Measure transmittance curve after the modification of control system

区间产生了一个低谷,采用 Macleod 软件对实测曲线进行模拟分析,发现采用晶控监控的膜厚偏薄时,会导致 1064 nm 处透射率降低,因此将晶控 tooling 值由 78 调整到 73。实验曲线如图 6 所示。

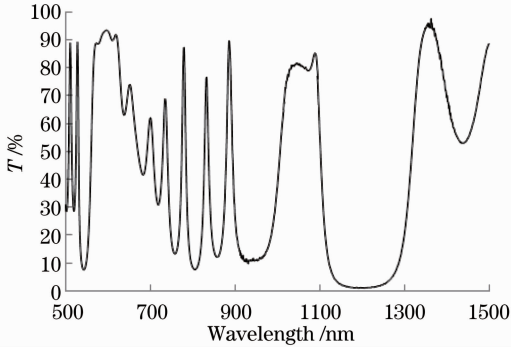


图 6 最终透射率测试曲线图

Fig. 6 Final measure transmittance curve

如图 6 曲线所示,在 1040~1080 nm 处的低谷已经明显减小,但是并未完整消除,根据分析,可能是由于制备过程中设备的监控累积误差造成的。在样品片的背面镀制相应的增透膜,最终所得的双面光谱曲线如图 7 所示。测试结果如表 2 所示。

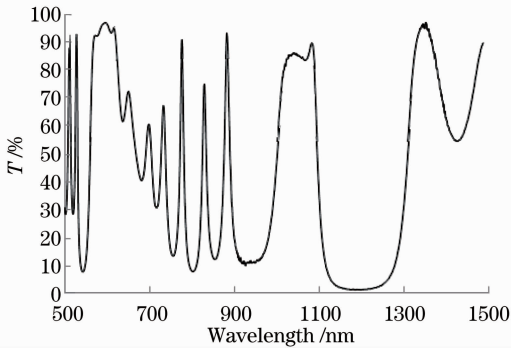


图 7 最终双面透射率测试曲线图

Fig. 7 Final measure transmittance curve of double surface

表 2 透射率测试结果数据

Table 2 Data of measure transmittance

Wavelength / nm	Transmittance / %
589	95.64
1064	83.58
1178	1.36
1342	95.22

各点透射率值均在要求误差范围之内,满足设计要求。

4.2 环境测试

1) 附着力测试:用胶带粘附在膜层表面,然后沿薄膜的垂直方向拉起,重复 20 次,无脱膜现象。

2) 高温测试:在 300 °C 的高温中对基片烘烤

2 h,膜层未出现龟裂及脱膜现象,光谱曲线未出现变化。

3) 湿度测试:在相对湿度为 95% 的常温环境下,将基片放置 24 h,基片的光谱曲线未有明显变化。

5 结 论

采用电子束真空蒸镀的方法加以离子源辅助淀积,研制了 589 nm 激光器光路整合系统滤光膜,对监控误差进行了详细研究,重点解决了厚度误差对光谱特性的影响。为了减小膜厚误差,采取的措施如下:1) 根据膜层厚度对光控片进行合理分配。2) 在设计膜系时对敏感度较高的膜层及时更换探头。3) 通过实验得到 Ta₂O₅ 与 SiO₂ 的光控厚度比例,以此为依据重新修改膜系。4) Ta₂O₅ 镀制在光洁基片上和直接镀在有膜的基片上,虽然监控厚度相同,但实际厚度并不相等,应按实际厚度设计膜系。

虽然制备的薄膜满足使用要求,但是与理论设计相比仍有一定的误差,所以如何提高 1040~1080 nm 的透射率成为今后的研究方向。

参 考 文 献

- Li Shutao. All-Solid-State Yellow Laser[D]. Jinan: Shandong University, 2008. 8~12
- 李述涛. 全固体黄光激光器[D]. 济南: 山东大学, 2008. 8~12
- He Caimei, Fu Xiuhua, Sun Yulin *et al.*. Study and fabrication of multi-band laser filter film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1550~1553
- 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
- Zhang Jing, Fu Xiuhua, Pan Yonggang. Design and fabrication of satellite laser communication filter coating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 303~306
- 张 静, 付秀华, 潘永刚. 卫星激光通信滤光膜的研制[J]. *光子学报*, 2012, **41**(3): 303~306
- 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): 903~906
- 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): 903~906
- Yang Yongliang, Fu Xiuhua, Liu Guojun *et al.*. Study and fabrication of multi-wavelength laser antireflection film using new mixed materialr[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1007002
- 杨永亮, 付秀华, 刘国军 等. 采用新型混合材料的多波长激光减反射膜的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1007002
- Fan Huanhuan, Zhang Yueguang, Shen Weidong *et al.*. Optical properties of Ta₂O₅ thin films fabricated by atomic layer deposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1031001
- 范欢欢, 章岳光, 沈伟东 等. 原子层沉积制备 Ta₂O₅ 薄膜的光学特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1031001
- Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 103~118
- 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. 103~118
- 8 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
- 9 Wang Yingjian, Li Qingguo, Fan Zhengxiu. Property comparison of optical thin films prepared by E-beam, ion assisted deposition and ion beam sputtering [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(9): 841~844
- 王英剑, 李庆国, 范正修. 电子束、离子辅助和离子束溅射三种工艺对光学薄膜性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(9): 841~844
- 10 Huang Yun, Wu Suyong, Yang Kaiyong. Active design of multilayer optical coatings based on sensitivity control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0431002
- 黄 云, 吴素勇, 杨开勇. 基于灵敏度控制的光学薄膜膜系主动设计方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0431002

栏目编辑: 韩 峰