

doi: 10.3788/gzxb20144305.0531001

基于 Nd : YVO₄ 晶体四波段腔面膜的研制

付秀华, 韩放, 张静, 寇洋, 潘永刚

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要: 黄光激光器作为一种接近人眼敏感区域的激光器在诸多领域都发挥着重要的作用, 而谐振腔又是激光器中重要组成部分. 本文以 Nd : YVO₄ (c-cut) 晶体为基底, 利用真空镀膜设备研制出四波段腔面膜. 通过分析膜系设计过程中膜层电场强度和优化膜系, 使膜层中驻波场强得到合理分布, 从而在理论上减小膜层损伤的可能性; 通过 TFCalc 软件对测试结果进行工艺反馈分析, 经过多次模拟实验, 发现在不同控制波长下, 采用相同监控方法监测不同的膜厚比例系数, 通过调整工具因子解决了光谱曲线漂移的问题, 制备出膜层牢固、化学性能稳定、满足四个波段光谱输出的黄光激光器腔面膜.

关键词: 薄膜光学; 腔面膜; 膜系设计; 黄光激光器; 掺钕钒酸钇晶体

中图分类号: O484.8

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0531001-5

Fabrication of Four Wavelengths Cavity Surface Film Based on Nd : YVO₄ Crystal

FU Xiu-hua, HAN Fang, ZHANG Jing, KOU Yang, PAN Yong-gang

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

Abstract: The yellow laser, which is close to the sensitive area of human eyes, plays an important role in many fields, and the resonant cavity is an important component of laser. A four wavelengths cavity surface film by using a vacuum coating equipment was developed based on Nd : YVO₄ crystal (c-cut). First, in the process of film system design, the distribution of standing wave field reasonably in the film was made by analyzing the film field strength and optimizing the film system, thus to reduce the possibility of film damage theoretically. Then, through technics feedback analysis to the test result by TFCalc and several simulation experiments, it was found that in different wavelengths the film thickness ratio is different even in the same monitoring method. And the problem of spectral curve drift was solved by adjusting the tool factor. Finally, the yellow laser cavity surface film with firm film and stable chemical performance was prepared, which also met the requirements of four wavelengths spectral output.

Key words: Thin films; Cavity surface film; Interference cut-off filter film; Yellow laser; Nd : YVO₄

OCIS Codes: 310.6805; 310.6860; 310.1860

0 引言

目前 589 nm 黄光激光器在军用、民用、医疗等领域都有着越来越广泛的应用, 在激光钠导引星、激光雷达、激光医疗、舞台灯光、城市观景科学研究等领域有广泛的应用前景. 主要应用在钠信标技术上, 可以配合自适应光学系统补偿大气对波前扰动, 是获得清晰天

文图像的有效手段. 另外, 589 nm 激光在皮肤治疗方面的应用也在研发试验阶段^[1-2]. 而获得 589 nm 黄光激光的方式也越来越多样化. 其中全固态激光器以其结构紧凑、转换效率高、安全可靠等特点更是获得迅猛发展, 目前全固态激光器获得黄光激光主要的方法是通过和频或受激喇曼散射 (Stimulated Raman Scattering, SRS) 效应^[3].

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60977052) 资助

第一作者: 付秀华 (1963-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学薄膜技术和光学制造技术. Email: goptics@126.com

通讯作者: 韩放 (1989-), 男, 硕士, 主要研究方向为现代光学技术与工程应用. Email: hanfang2011@yeah.net

收稿日期: 2013-08-19; 录用日期: 2013-10-30

<http://www.photon.ac.cn>

本文基于 Nd : YVO₄ 晶体的喇曼效应,由 1 064nm 产生的 1 178 nm 喇曼光,1 178 nm 波长激光在 LBO 腔内倍频得到 589 nm 脉冲激光,在此谐振腔中需要严格控制 1 064 nm 的透过率,使 589 nm 黄光激光器达到最佳的倍频输出^[4]. 因此在 Nd : YVO₄ 晶体表面镀制腔面膜变得十分重要. 由于同时存在多个波段的反射和透过,给设计和制备带来了一定难度. 本文通过合理安排电场强度,从理论上减小了膜层损伤的可能性;并研究了在不同控制波长下,采用相同监控方法解决膜厚比例系数不同的问题.

1 膜系设计

1.1 参量要求

根据激光器产生的原理和条件,激光器腔面膜的参量要求如表 1.

表 1 黄光激光器谐振腔 Nd : YVO₄ 基底腔面膜参量要求
Table 1 Yellow laser resonator Nd : YVO₄ substrate cavity face film parameters required

Wavelength/nm	Reflectivity
589	96%~98%
1 064	1%~3%
1 178	≥97%
1 342	≥98%

表 1 中反射率公差范围很小,所以制备有一定难度.

1.2 镀膜材料的选择

Nd : YVO₄ 晶体作为基底,其折射率为 1.96,在 400~5 000 nm 范围内都有很高的光学透光度^[5],且机械性能和化学性能均稳定,但热导率小. 所以需要选择吸收小、熔点高、热传导性好、化学性能稳定的镀膜材料.

综合考虑材料的光学、物理、化学、机械等特性,能满足要求的高折射率材料有 Ta₂O₅、ZrO₂、TiO₂. 低折射率材料有 SiO₂ 和 MgF₂^[6].

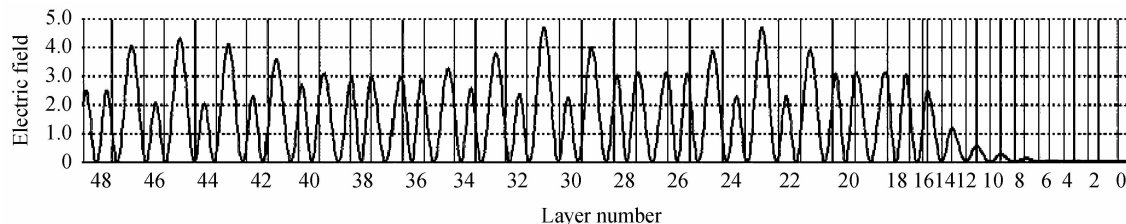


图 2 方案一的膜层电场强度分布

Fig. 2 The electric field intensity distribution layer of option one

从图 2 可以看出电场强度偏大且 17 与 18 层、18 与 19 层、19 与 20 层等,高低折射率界面处存在着电场强度峰值,在不考虑薄膜缺陷存在时,薄膜损伤的初始位置应该在高低折射率材料的界面^[9],因此为了提高抗损伤能力应尽量避免电场强度的峰值落在界面处^[10-11].

经过实验,选择 Ta₂O₅ 作为高折射率材料, SiO₂ 作为低折射率材料. 因为此两种材料具有较高的抗激光损伤阈值,蒸发状态稳定,机械牢固度和抗腐蚀能力都较好,且这两种材料具有良好的应力匹配^[7-8].

1.3 膜系设计

从参量要求考虑,膜系由两个反射膜堆叠而成,同时满足 1064 nm 高透,即 589 nm 反射、1 178 nm 与 1 342 nm 反射. 在设计中尽可能保持 1 064 nm 透射区拥有足够的宽度,但不能影响 1 178 nm 的反射率.

首先采用 Sub|(HL)⁹2.2H(2.2L2.2H)¹³|Air 作为初始膜系,其中 H 和 L 分别代表膜料 Ta₂O₅ 和 SiO₂. Sub 表示 Nd : YVO₄ 基底, Air 表示入射介质空气. 经过 TFCalc 软件优化膜系为: Sub|0.135L(HL)⁷0.527H0.898L2.25(HL)⁷0.25H2.069L2.13(HL)⁶2.13H2.179L2.81H|Air. 理论反射率曲线如图 1.

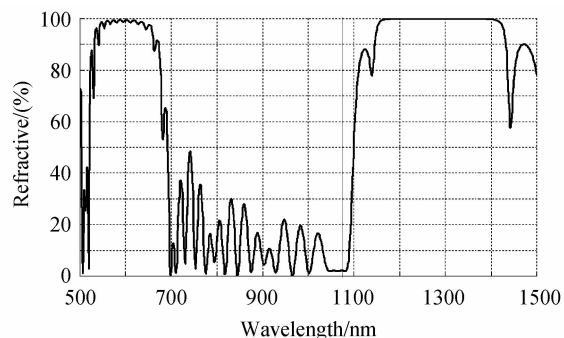


图 1 方案一的理论反射率曲线

Fig. 1 Theoretical reflectance curves of option one

从激光损伤机理考虑,HR 膜是反射电磁波的高反区域反射的电磁波,会在膜内建立一个驻波场. 通过 TFCalc 软件可以得到如图 2 所示的膜层电场强度分布图.

经过反复优化膜系结构,得到最终膜系为: Sub|1.074H1.033L0.846H0.964L1.187H1.234L0.871H0.56L1.262H1.161L(HL)⁴(2.2H2.2L)¹¹2.435H1.813L2.294H2.166L3.293H|Air. 并得到图 3 所示的反射率曲线.

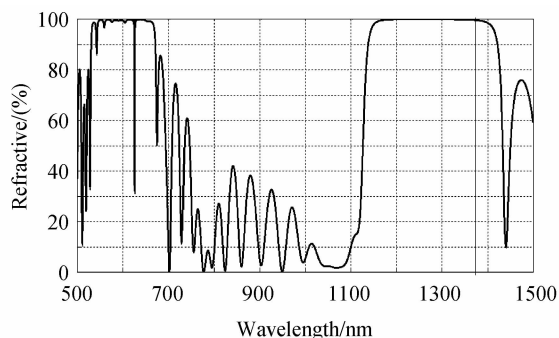


图3 方案二的理论反射率曲线

Fig.3 Theoretical reflectance curves of option two

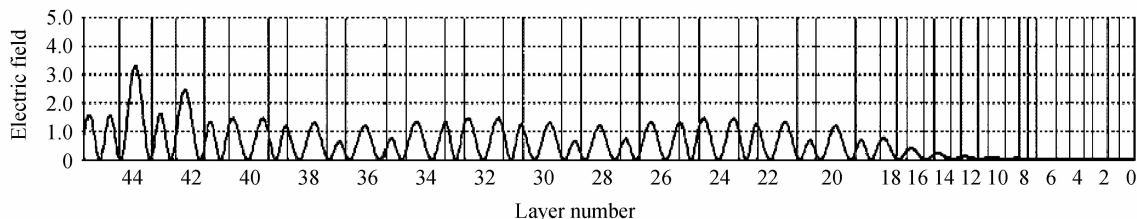


图4 方案二的膜层电场强度分布

Fig.4 The electric field intensity distribution layer of option two

2 薄膜制备

在国产 900 型全自动真空镀膜机上镀制薄膜,该设备配有两个 E 型电子枪和考夫曼离子源辅助淀积系统,同时配有双探头的 SQC-310 型晶控系统,在线监控系统采用 Filmonitor BS2030 监控膜层光学厚

膜系是由周期膜系与非周期膜系组成,前 10 层和后 5 层为非周期膜系,主要影响 1 064 nm 处透率,12 层到 40 层为周期膜系,对三个波段的发射率其主要作用.从理论设计曲线得到 589 nm 处反射率为 97.32%,1 064 nm 处为 1.87%,1 178 nm 处为 99.68%,1 342 nm 处为 99.86%.其电场强度分布如图 4 所示,虽然也有部分峰值落在高低折射率交界面处,但相比之前设计,电场强度的峰值有所下降,在合理分配电场强度上有明显改善.最终选定此膜系进行镀制.

度^[12-13].

实验过程中当真空度达到 8.0×10^{-2} Pa 时对工件进行烘烤加热,温度设定为 290℃.真空度达到 2.2×10^{-3} Pa 时,打开考夫曼离子源并轰击基底 20 min,然后开始蒸镀^[14].离子源参量见表 2.

表 2 离子源参量

Table 2 Ion source parameters

Plate voltage/V	Accelerating voltage/V	Anode voltage/V	Neutralize current/A	Cathode current/A	Ion beam/mA
415	275	55	13	14	50

3 测试结果及分析

采用日本岛津 UV-3150 分光光度计对实验样品进行检测,因为分光光度计对测试件尺寸有要求,所以上实验样品基底均为 K9 玻璃,然后通过 TFCalc 软件模拟 K9 基底曲线,再与实际测试曲线进行对比分析,如图 5.

由图 5 可以看出,近红外反射区明显向长波漂移,利用 Macloed 软件对测试曲线进行反馈分析,发现主要因为采用光学控制法监控膜厚存在误差,重新对光控部分进行镀制,即 (HL)⁴ 和 (2.2H 2.2L)¹¹,得到测试曲线图 6.

对图 6 的曲线进行比较,发现 (2.2H 2.2L)¹¹ 比 (HL)⁴ 曲线向长波漂移更明显,在制备过程中

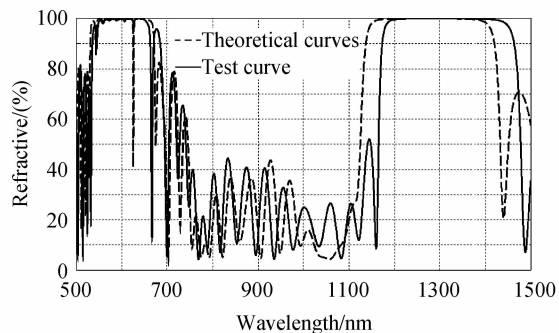
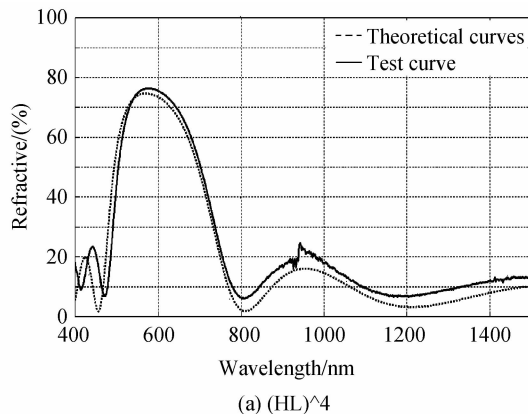


图5 测试曲线与理论设计曲线比较

Fig.5 Test curve compared with the theoretical design curves



(a) (HL)⁴

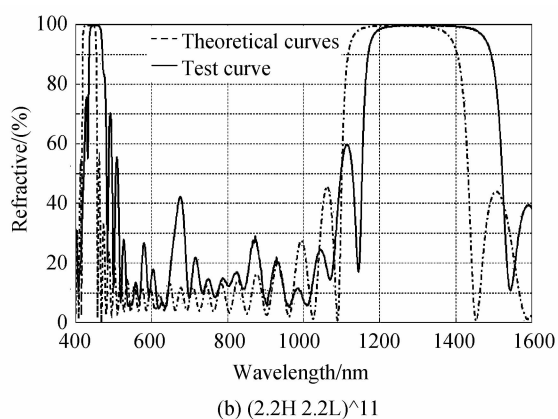
(b) $(2.2H\ 2.2L)^{11}$

图6 测试曲线与理论设计曲线比较

Fig. 6 Test curve compared with the theoretical design curves $(HL)^4$ 与 $(2.2H\ 2.2L)^{11}$ 由两个不同的监控波长控制,通过软件分析发现不同的监控波长下镀制的高低折射率膜厚比例不同,从而影响了光谱位置.经过修正 $(HL)^4$ 和 $(2.2H\ 2.2L)^{11}$ 的膜厚比例系数,调整工具因子,即理论与实际之间的比例关系^[15],再次进行试验,检测的结果如图7.

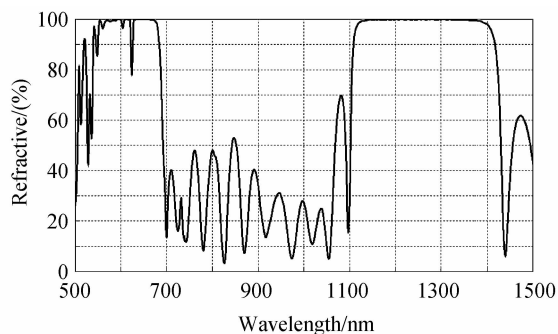


图7 改进工艺后测试曲线

Fig. 7 After the test curve improved technology

从图7中可以看出589、1178、1342 nm波长处已满足要求,但1064 nm透过率为87%,不满足要求.利用软件分析发现膜系后五层对1064 nm处通带透过有很大影响,而在沉积过程中,由于石英晶片是依靠自身振荡频率来检测薄膜厚度,当积累到一定厚度时,灵敏度下降,因此加大了膜厚误差.为了解决这一问

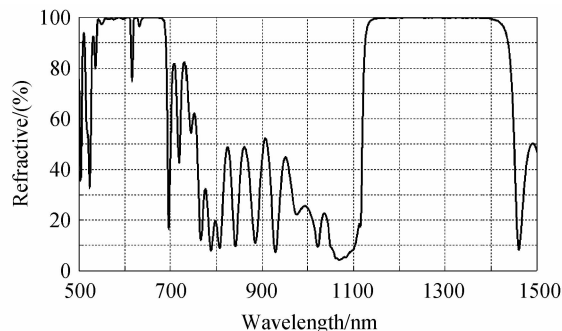


图8 最终测试反射率光谱曲线

Fig. 8 Final test reflectance spectra

题,实验中在后五层时改为二号晶控探头进行监测,得到最终测试光谱曲线如图8所示.

从图8中可知1064 nm处反射率2.51%,589 nm处反射率97.26%、1178 nm处反射率99.33%、1342 nm处反射率99.84%满足腔面膜使用要求.

4 结论

在膜系设计过程中,以 Ta_2O_5 作为高折射率材料, SiO_2 作为低折射率,从驻波场影响薄膜抗激光损伤的角度,理论上提高了薄膜的抗激光能力.采用国产电子束真空镀膜机离子源辅助沉积,在制备过程中对监控误差进行了研究,利用膜系设计软件TFCalc进行反馈分析,通过修正工具因子减小了 $(HL)^4$ 和 $(2.2H\ 2.2L)^{11}$ 在不同监控波长下所产生的随机误差.最终研制出了在Nd:YVO₄基底上的多波段的腔面膜.虽然制备出的薄膜基本符合要求,但仍然需要加强和改进制备工艺,从其他因素考虑,进一步提高激光器腔面膜的抗激光损伤阈值.这也是今后激光器腔面膜的研究趋势.

参考文献

- [1] WANG Yu-ning, DING Yun-feng. Research on high power all-solid-state 589nm yellow laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012: 4.
王禹凝, 丁蕴峰. 高功率全固态589nm黄光激光器的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012: 4.
- [2] LU Yan-hua, ZHANG Lei, LIU Shen-gx, et al. 15.5 W All-solid-state extra-cavity sum-frequency generation 589 nm yellow laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(9): 2420.
鲁燕华, 张雷, 刘晟西, 等. 15.5 W全固态腔外和频589 nm黄光激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2420.
- [3] WANG Zhi-chao, DU Chen-lin, RUAN Shuang-chen. Research progress of all-solid-state yellow lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(1): 34.
王志超, 杜晨林, 阮双琛. 全固态黄光激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(1): 34.
- [4] LIU Bo, ZHANG Xing-yu, WANG Qing-pu, et al. Diode-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YVO₄ self-raman yellow laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(10): 1778.
刘波, 张行愚, 王青, 等. LD抽运Nd:YVO₄自喇曼倍频黄光激光器[J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1778.
- [5] WANG Guo-fu, WU Shao-fan. Research and development of neodymium doped yttrium vanadate laser crystal[J]. *Materials China*, 2010, **29**(10): 28-29.
王国富, 吴少凡. 掺钕钒酸钇激光晶体的研制和开发[J]. *中国材料进展*, 2010, **29**(10): 28-29.
- [6] FAN Zheng-xiu, HU hai-yang, FAN Rui-ying, et al. Study and preparation of the high power laser coatings[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(2): 197.
范正修, 胡海洋, 范瑞瑛, 等. 高强度激光薄膜的研制[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(2): 197.
- [7] PAN Yong-gang, LIU Dong-mei, ZHANG Jing, et al. The research of three wave bands filters used in free space communication system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(013101): 4.

- 潘永刚,刘冬梅,张静,等.空间光通信系统三波段滤光膜的研究[J].激光与光电子学进展,2012,49(013101):4.
- [8] 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, 35(6): 1552.
贺才美,付秀华,孙钮林,等.多波段激光滤光膜的研制[J].中国激光,2009,35(6):1552.
- [9] LI Zhong-ya, LI Fu-cheng, GUO Ju-ping, *et al.* Optical thin film the wavelength of laser damage effect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1991, 18(1): 30-33.
李仲伢,李成富,郭聚平,等.光学薄膜激光损伤的波长效应[J].中国激光,1991,18(1):30-33.
- [10] 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,2006:338-344.
- [11] ZHOU Ming, ZHAO Yuan-can, Li Da-wei, *et al.* Laser damage of optical film with the combined irradiation of 1064 nm and 532 nm pulse[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 35(11): 3052.
周明,赵元安,李大伟,等.1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜的损伤[J].中国激光,2009,35(11):3052.
- [12] FU Xiu-hua, SUN Ying-jie, LIU Dong-mei, *et al.* Study and fabrication of visible and infrared broadband antireflection coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0331002.
付秀华,孙英杰,刘冬梅,等.可见与近红外宽带减反膜的研制[J].光学学报,2013,33(3):0331002.
- [13] YANG Yong-liang, FU Xiu-hua, LIU Guo-jun, *et al.* Study and fabrication of multi-wavelength laser antireflection film using new mixed material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(10): 1007002-3.
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):1007002-3.
- [14] YAN Hao, FU Xiu-hua, ZHENG Shuang. Design and fabrication of visible-blind uv detectors system filter[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2012, 35(2): 8.
闫昊,付秀华,郑爽.日盲型紫外探测系滤光膜的研制[J].长春理工大学学报,2012,35(2):8.
- [15] FU Xiu-hua, HUANG Jin-long, MO Zhao-yan, *et al.* Design and fabrication of 589 nm laser optical path integration system filter film[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0307001-4.
付秀华,黄金龙,莫朝燕,等.589 nm 激光器光路整合系统滤光膜的研制[J].中国激光,2013,40(3):0307001-4.