

文章编号: 1001-4322(2005)S0-0167-04

一种用于 Yb:YAG 激光器的波长分离膜的研制*

张伟丽, 黄建兵, 赵元安, 邵建达, 范瑞瑛, 范正修

(中国科学院 上海光学精密机械研究所 光学薄膜技术研究中心, 上海 201800)

摘 要: 以 1 030 nm 高反, 940, 980 nm 高透的波长分离膜作为实例, 为提高该薄膜元件的波长分离效果, 从膜系的优化方面做了一系列的研究, 诸如采用带通滤光片的设计思想, 在膜堆两侧加入了匹配层, 调整膜堆的周期厚度, 并用膜系设计软件对通带作进一步的优化。通过这一系列的优化设计后, 利用 RF 双离子束溅射工艺在 BK7 玻璃基底上沉积样品薄膜, 并在基底背面加镀通带增透膜。结果显示, 透射带在 940 和 980 nm 处的透过率分别为 97.73% 和 93.63%, 反射带在 1 030 nm 的反射率为 99.99%。对所制备的样品薄膜进行了激光损伤阈值测量, 得到了 35 J/cm² (1 064 nm, 12 ns) 的结果。

关键词: 波长分离膜; 损伤阈值; 膜系; Yb:YAG 激光器

中图分类号: TN248, O484 **文献标识码:** A

在 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 泵浦波长在 0.9~1.1 μm 的 InGaAs 激光二极管(LD)出现^[1], 并开始迅速发展起来, 大功率的 LD 阵列已成为稳定的泵浦源, 而适应这一波段的掺 Yb³⁺ 激光材料开始引起人们极大的研究兴趣^[2~7]。与 Nd³⁺ 相比, Yb³⁺ 离子能级结构简单, 荧光寿命长, 量子效率高, 更适合于 LD 泵浦。在掺 Yb³⁺ 激光材料中, 由于 Yb:YAG 晶体具有大的晶场分裂能、宽的吸收带宽、在较高的掺杂浓度下也不会出现浓度淬灭现象、热承载小等优点, 而成为激光二极管泵浦固体激光器增益介质研究的主要方向之一。Yb:YAG 晶体有两个主吸收峰^[8], 中心波长分别在 940 和 980 nm 处, 大的峰值吸收截面能够高效吸收泵浦能量, 有利于实现激光二极管泵浦, 其中 940 nm 的波长非常适合于激光二极管泵浦, 并且由于该波长处的吸收带宽高达 18 nm, 使得激光二极管不需要复杂的温控系统。Yb:YAG 晶体的发射谱中心波长位于 1 030 nm 处^[8], 该处的发射谱带也很宽, 可在较长的波长范围内调谐。Yb:YAG 晶体宽的吸收光谱和大的吸收截面能充分吸收泵浦光, 提高泵浦光的转换效率, 以及宽的荧光光谱也使 Yb:YAG 激光器的实用化及锁模脉冲的形成成为可能。但是该晶体的吸收谱和发射谱在 1 030 nm 波长附近有较大的重叠, 存在着较严重的自吸收效应, 这种自吸收效应将会严重地影响激光输出。解决这种效应的方法之一就是在 Yb:YAG 晶体上镀制分离效果好的波长分离膜, 但是由于泵浦光和基频发射光波长位置非常接近, 传统的短波通膜系很难实现, 这就对镀膜提出了更高的要求。本文针对 940 和 980 nm 的泵浦光和 1 030 nm 的基频发射光, 首先采用膜系设计软件对该波长分离膜进行设计和优化, 然后在实际中镀制出效果很好的薄膜样品。

1 膜系设计

在设计波长分离膜时, 传统的思路是选用短波通膜系或者长波通膜系, 然后在多层膜的两侧(靠近基底侧和靠近入射介质侧)加镀匹配层, 使其同基底以及入射介质匹配, 通过这种方法来压缩通带波纹以获得宽而平的通带。这种方法对一些波长分离膜是有一定效果的, 比如倍频分离膜, 但对于一些波长位置非常接近的波长分离膜来说, 并不能达到很好的分离效果。为了弥补这一缺点, 我们突破传统的膜系修正方法, 根据法布里-珀洛结构, 采用带通滤光片的设计思想, 在 BK7 基片上设计出一个普通的带通滤光片, 然后利用 TFCal 膜系设计软件对膜系进行优化, 得到了一个通带很平而且宽度达 65 nm 的波长分离膜, 通带的透射率约为 95% (单面)。设计曲线见图 1。为了进一步提高波长分离的效果, 我们考虑在镀有波长分离膜的基片另一面镀制 900~1 000 nm 的宽带增透膜, 设计曲线如图 2, 由图可知在 900~1 000 nm 范围内反射率小于 0.05%。在 BK7 基片上一面镀有波长分离膜另一面镀有宽带增透膜的设计曲线见图 3。由图 3 可知, 在 928~993 nm 范围内透射率约 100%, 1 030 nm 处反射率大于 99.99%。我们所设计的这个膜系完全达到了波长分离的目的。

* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-03-06
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 上海市光科技项目资助课题
作者简介: 张伟丽 (1975—), 女, 山东潍坊人, 博士, 副研, 主要从事强激光薄膜和各类光学薄膜的研究; E-mail: zhweili@opfilm.com.

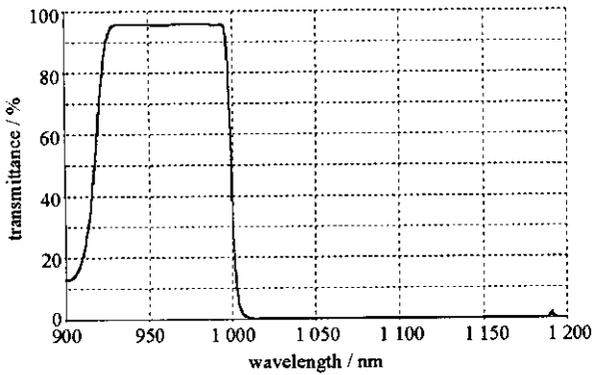


Fig. 1 Design curve for the wavelength separating multilayer

图 1 940 nm AR, 980 nmAR, 1030 nmHR 的设计曲线

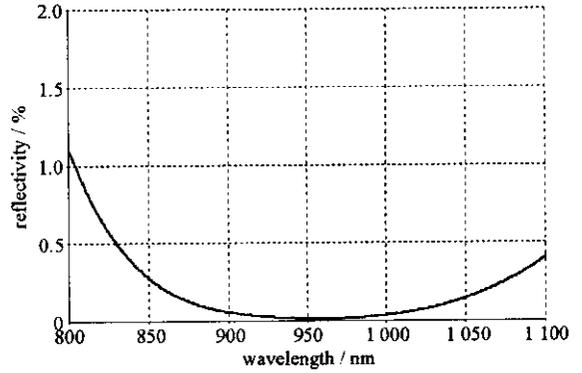


Fig. 2 Design curve for wide-band antireflection film

图 2 900~1 000 nmAR 的设计曲线

2 样品制备

样品制备前, BK7 基底采用去离子水浸泡 10 min, 然后用石油醚擦洗。采用双 RF 离子束溅射镀膜机制备, 其中一个为 16 cm 的溅射源, 另一个为 12 cm 的辅助源。Ar 和 O₂ 为 RF 离子源和靶材供给气体, 溅射源的 Ar 流量是 48 cm³/min, RF 中和器的 Ar 流量是 5 cm³/min, 辅助源的 Ar 和 O₂ 的流量比 1:4 (3 cm³/min:12 cm³/min), 吹向靶材的 O₂ 的流量是 25 cm³/min。溅射靶材是纯度为 99.999% 的 SiO₂ 和纯度为 99.999% 的 Ta, Ta₂O₅ 是由 Ta 溅射后与纯度为 99.995% O₂ 反应生成。本底真空是 4×10⁻⁵ Pa, 制备过程中其真空为 4.8×10⁻² Pa, 烘烤温度为 136 ℃。

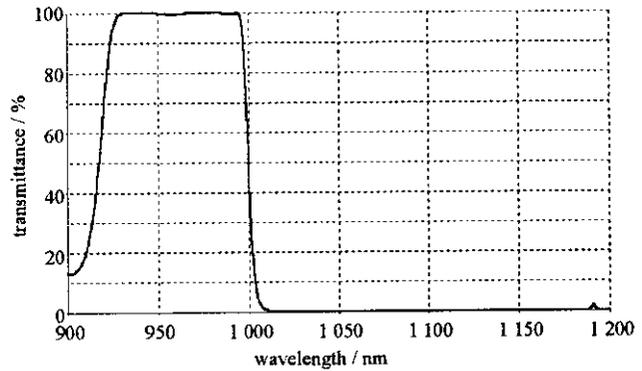


Fig. 3 Design curve for the wavelength separator with two side films on BK7 substrate

图 3 BK7 基片上一面镀增透膜另一面镀波长分离膜的设计曲线

为了准确实现所设计的膜系, 分别对每种材料的薄膜的折射率和沉积速率进行定标。膜层的物理厚度是用时间控制法来实现的。首先用一定的时间做一定厚度的单层薄膜, 然后测量出其光谱曲线, 根据 Cauchy 公式准确地确定出其折射率和物理厚度^[9]。最后, 我们分别算出沉积速率: Ta₂O₅ 是 0.272 nm/s; SiO₂ 是 0.225 nm/s, 其折射率在 1 440 nm 波长处分别为 2.076 和 1.473。

3 实验结果

3.1 光谱特性

采用 PERKIN Elmer Lambda 900 分光光度计对制备的样品进行正入射测量(避免由于角度误差, 带来光谱曲线的漂移), 测量波长范围是 900~1 200 nm, 波长间隔是 2 nm, 测量的温度恒为 24 ℃, 湿度为 50% 左右, 其透射率曲线见图 4(单面镀制波长分离膜)和图 5(一面镀波长分离膜另一面镀制宽带增透膜)。由图 4 可知, T₉₄₀=92.85%, T₉₈₀=89.59%。在已经镀制了分离膜的基片的另一面镀制 900~1 000 nm 的宽带增透膜后, 使 940, 980 nm 的增透效果大大提高, 由图 5 可知 T₉₄₀=97.73%, T₉₈₀=93.63%。

3.2 损伤阈值特性

薄膜损伤阈值测量装置由 Nd:YAG 调 Q 激光器、He-Ne 准直光源、分光镜、聚焦凸透镜、二维可移动样品平台、CCD 和能量计组成, 最后整套系统用电脑进行控制。其中 Nd:YAG 脉冲激光器(max laserkids laser)输出波长为 1 064 nm, 模式为 TE₀₀, 脉宽(FWHM)为 12 ns, 采用刀口扫描法测得作用在靶面的有效光斑直径(1/e² 半径)为 406 μm, 最大脉冲能量为 100 mJ, 能量稳定性为 -5%~5%。样品平台用步进电机进行驱动, 可在 x, y 两个方向移动, 保证测试光斑在整个薄膜的不同区域进行激光损伤测试。样品的测试采用 1-on-1 的作用方式进行, 取 0 损伤几率时的能量密度作为样品的损伤阈值^[10,11]。测得所镀制薄膜的损伤阈值为 35 J/cm², 如图 6 所示。

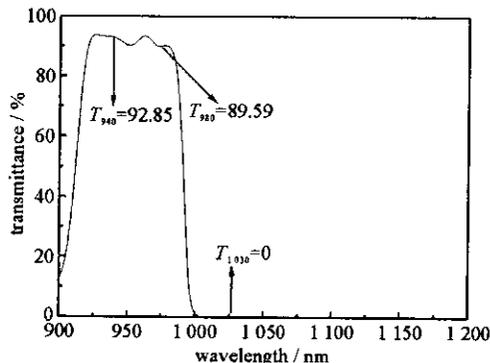


Fig. 4 Measurement curve for the wavelength separator with one side film on BK7 substrate

图4 BK7基片上镀940 nmAR,980 nmAR、1 030 nmHR的实际曲线

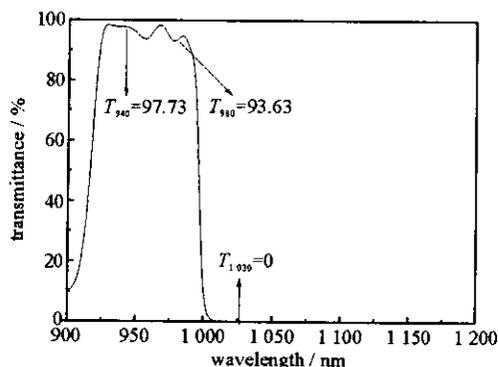


Fig. 5 Measurement curve for the wavelength separator with two side films on BK7 substrate

图5, BK7基片上一面镀940 nmAR,980 nmAR,1 030 nmHR膜,另一面镀900~1 000 nmAR膜的实际曲线

3.3 讨论

本文采用区别于传统薄膜修正短波通的设计思想,根据法布里-珀洛结构,设计出 940 nmHT,980 nmHT 和 1 030 nmHR 的波长分离膜,为修正长波通和短波通提供了一个新思路。在实际镀膜中采用双 RF 离子束溅射法,物理厚度采用时间控制法控制,由于膜料的损耗问题以及实际的工艺使得控制上稍有误差,所镀制薄膜并不能像设计的那样透射率高达 100%,但是薄膜可同时满足 940 和 980 nm 透射率高于 90%,这样在实际应用中可以同时使用两个泵浦源,从而提高泵浦效率,已满足现有 Yb:YAG 激光器的应用要求。另一方面,双 RF 离子束溅射法所镀制薄膜结构致密,缺陷少,稳定性好,损伤阈值可达 35 J/cm²

,这对于全固态激光器中高功率的要求是很有吸引力的。由于本文镀膜基底是 BK7,并不能应用在 Yb:YAG 激光器中,但我们的工作对在 Yb:YAG 基底上镀膜将提供一定的参考价值,在此基底上的镀膜工作将是我们下一步的研究重点。

4 结论

本文针对 Yb:YAG 激光器中用 940 nmHT,980 nmHT,1 030 nmHR 的波长分离膜,首先采用带通滤光片的设计思想,在 BK7 基片上设计出带宽在 65,940,980 nm 透射率高达 100%,1 030 nm 反射高达 99.99% 的波长分离膜。采用双 RF 离子束溅射法在 BK7 基片上进行双面实际镀膜,结果显示 940 nm 波长处透射率为 97.73%,980 nm 处的透射率为 93.63%,1 030 nm 处反射率为 99.99%。对所镀制薄膜进行损伤测试,该薄膜的损伤阈值可达到 35 J/cm²。

参考文献:

- [1] Klbas R M, Anderson N G, Laidig W D, et al. Strained-layer InGaAs-GaAs photopumped and current injection laser[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1988, **24**(8):1605—1613.
- [2] Lacovara P, Chai H K, Wang C A, et al. Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 1991, **16**(14):1089—1091.
- [3] Honea E C, Beach R J, Mitchell S C, et al. High-power dual-rod Yb:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(11):805—807.
- [4] Aus der Au J, Sphler G J, Sdmeyer T, et al. 16.2 W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(11):859—861.
- [5] 张丽哲,戴建明,张伟力,等.全固化可调谐 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2001, **28**(10):873—876. (Zhang L Z, Dai J M, Zhang W L, et al. Tunable diode-pumped Yb:YAG laser. *Chinese J of Lasers*, 2001, **28**(10):873—876)
- [6] Brauch U, Giesen A, Karszewski M, et al. Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1 018 and 1 053

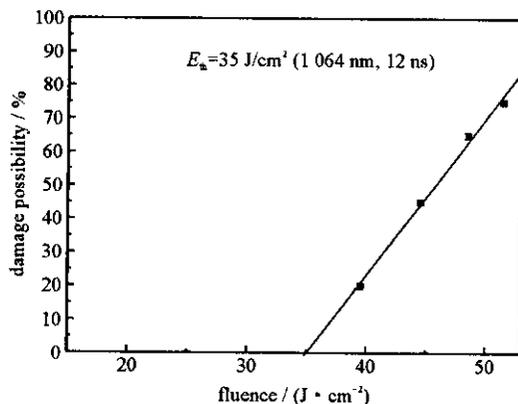


Fig. 6 Laser-induced damage threshold for the deposited sample

图6 所制备样品的损伤几率图

- nm[J]. *Opt Lett*, 1995, **20**(7):713.
- [7] Brunner F, Paschotta R, Aus der Au J, et al. Widely tunable pulse durations from a passively mode-locked thin-disk Yb:YAG laser[J]. *Opt Lett*, 2001, **269**(6):379—381.
- [8] 杨培志, 邓佩珍, 徐军, 等. Yb:YAG 晶体的光谱和激光性能[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1):132—135. (Yang P Z, Deng P Z, Xu J, et al. Spectroscopy and laser performance of Yb³⁺ doped YAG crystal. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1):132—135)
- [9] 袁景梅, 汤兆胜, 齐红基, 等. 几种紫外薄膜材料的光学常数和性能分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 984—988. (Yuan J M, Tang Z S, Qi H J, et al. Analysis of optical property for several ultraviolet thin film materials. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 984—988)
- [10] Kuo P K, Zhang S Y. A new diffraction theory for the mirage effect and thermal lensing[J]. *Progress in Natural Science*, 1996, **6**(11): 191—205.
- [11] Optics and Optical instruments - Lasers and laser related equipment-Test methods for laser induced damage threshold of optical surfaces - Part 1: 1 on 1 test[S]. ISO/DIS 11254 - 1. 2.

A wavelength separation multilayer for Yb:YAG laser

ZHANG Wei-li, HUANG Jian-bing, ZHAO Yuan-an, SHAO Jian-da, FAN Rui-ying, FAN Zheng-xiu
(R&D Center for Optical Thin Film Coatings, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
P. O. Box 800-211, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: A wavelength separation multilayer with high reflectivity at 1 030 nm and high transmittance at 940 and 980 nm was obtained by optimizing the film stack, such as inserting matching layers, tuning the periodic thickness with the help of thin film design software. The Fabry-Perot configuration was adopted to increase the transmittance of pass-band. This applicable sample multilayer was carried out by dual ion beam sputtering on BK7 glass. The testing result shows that transmittances of 97.73% and 93.63% are obtained at 940 nm and 980 nm, respectively. A laser induced damage threshold (LIDT) of 35 J/cm² (1 064 nm, 12 ns) of the separation film is characterized with self-made testing facility.

Key words: Wavelength separation multilayer; Laser induced damage threshold; Film stack; Yb:YAG laser