

文章编号: 1001-4322(2005) S0-0155-04

倍频波长分离膜半波孔的消除^{*}

马小凤^{1,2}, 余 祥¹, 王英剑¹, 邵建达¹, 范正修¹

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 光学薄膜技术研发中心, 上海 201800; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 指出了膜料色散、膜层折射率非均匀性以及膜厚控制误差积累等是导致半波孔产生的几个因素, 其中膜层厚度周期性误差积累和敏感层厚度误差是导致半波孔的主要因素, 还指出了半波孔的大小与膜系结构有关。借助计算机做了相应的数值计算, 并从理论上进行了深入分析。针对这些因素采取相应的措施, 设计和制备了倍频波长分离膜, 有效地消除了半波孔。并给出了理论和实验光谱曲线, 二者有很好的一致性。

关键词: 倍频波长分离膜; 半波孔; 色散; 折射率非均匀性

中图分类号: O484

文献标识码: A

在众多的激光器件中, 由于其特有的优良性能以及近年来所取得的显著进展, 全固态激光器已成为当前激光技术发展的主要方向^[1]。目前国际上的宽频可调谐全固态激光器功率还比较低, 其原因除了激光晶体以及其它元器件的性能有待改善外, 能否研制出满足使用要求的高光学性能、高激光损伤阈值光学薄膜, 已经成为限制全固态激光器整体性能的“瓶颈”。在倍频激光器中由于激光晶体的倍频作用, 要求基频波与倍频波的分离, 所以倍频波长分离膜是全固态激光器的重要组成元件之一。然而对于要求基频波长 1.064 μm 高反射倍频波长 0.532 μm 高透射的分离膜, 在实际制备中往往会在通带区域, 即反射带中心波长的一半处出现一个反射峰, 我们称之为半波孔。它的出现极大地影响了该类膜的光谱性能, 然而在全固态激光器谐振腔中, 倍频波长分离膜要求达到很高的光谱性能指标。所以在制备过程中半波孔的消除是亟待解决的。

导致半波孔形成的因素很多, 有膜料的色散、膜层折射率非均匀性以及膜层厚度控制误差积累等^[2,3]。本文还提出了半波孔与膜系结构有关, 并且针对以上几种因素做了相应的计算模拟分析, 指出了膜层厚度周期性误差积累和敏感层厚度误差是导致半波孔的主要因素。最后, 针对这些因素采取相应的措施, 设计并制备出了不带半波孔的倍频波长分离膜。

1 理论计算与分析

图 1 为标准的倍频波长分离膜膜系的理论计算曲线, 膜系结构为: $G/(HL)^{13}H0.5L/Air$, 其中, H, L 分别表示光学厚度为 $1/4$ 中心波长的高低折射率膜层, 高折射率为 2.1, 低折射率为 1.46, 基底折射率为 1.52。图 2 为高低折射率膜料有色散时的理论计算曲线, 其色散数值见表 1 和表 2。该数值是通过这两种膜料的单层膜光谱曲线得到的, 且单层膜实验条件与这里的倍频波长分离膜制备条件保持一致。图 3 为膜层折射率非均匀性导致半波孔产生的理论曲线, 在计算机模拟计算中用均匀的多层膜代替非均匀膜, 其中高低折射率膜料

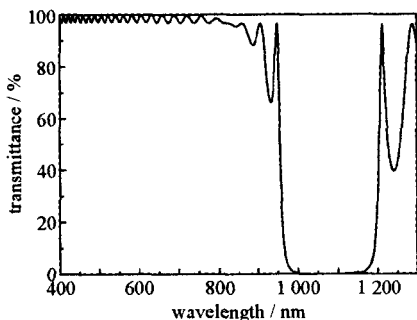


Fig. 1 Theoretical performance of harmonic beam splitter

图 1 标准波长分离膜理论曲线

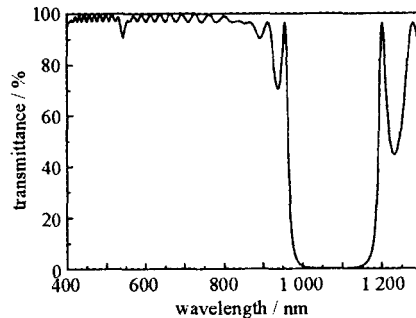


Fig. 2 Dispersion of film materials on half-wave hole

图 2 膜料色散对半波孔的影响

^{*} 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-03-25

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 马小凤 (1978 -), 女, 河南嵩县人, 硕士研究生, 主要从事全固态激光器用光学薄膜的研究; 上海 800-211 信箱; E-mail: xiaofengma@siom.ac.cn。

的非均匀性分别为 $\Delta n_H = 0.6$ 和 $\Delta n_L = 0.4$ 。经模拟可知,随着折射率非均匀性增大半波孔变得越深。但在实际镀膜过程中,膜层折射率非均匀性没有这么大,可见这一因素也不是导致半波孔产生的主要因素。以上的膜系结构均为: $G/ (HL)^{13} H0.5L/ Air$ 。

表 1 ZrO₂ 膜料的色散值
Table 1 Dispersion of ZrO₂ film

λ / nm	450	506	579	680	826	1 055
n	2.037	2.021	1.997	1.965	1.962	1.937

表 2 SiO₂ 膜料的色散值
Table 2 Dispersion of SiO₂ film

λ / nm	431	476	544	620	734	892	904	1 148
n	1.461	1.445	1.441	1.428	1.427	1.426	1.425	1.422

至于膜层厚度控制误差,根据监控技术一般可分为膜层周期性误差、敏感层误差和膜层随机性误差等。对于光电极值监控系统,由于基于导纳图圆的膜层误差补偿效应^[4],经 TFCALC 模拟(不考虑其它影响因素)可知,光电极值监控技术会带来一个周期性误差。膜系 $G/ (2H2L)^{13} 2HL/ Air$ 在实际制备中由于厚度控制走格回头量的影响,会转化为以下结构:

$$G/ (2.03H1.98L2.04H1.96L2.03H1.95L2.04H1.96L)^3 2.04H1.95L2.04H0.98L/ Air$$

高低折射率膜料分别为 Ta₂O₅ 和 SiO₂,基底为 K9 玻璃。其理论光谱曲线如图 4 所示。图 5 为敏感层误差对半波孔的影响,可见敏感层误差对半波孔的影响也较大。对于晶体振荡监控系统而言,膜层厚度误差是随机的。图 6 为所有膜层为随机误差时的理论光谱曲线,从中可以看出膜层随机误差对半波孔的产生没有影响。

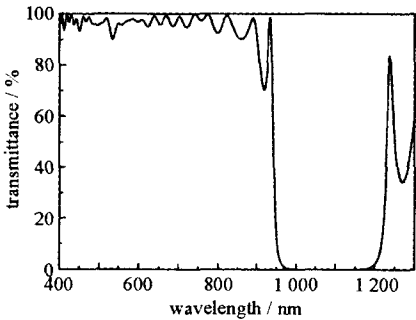


Fig. 3 Refractive index inhomogeneity of film layers on half-wave hole
图 3 膜层折射率非均匀性对半波孔的影响($\Delta n_H = 0.6, \Delta n_L = 0.4$)

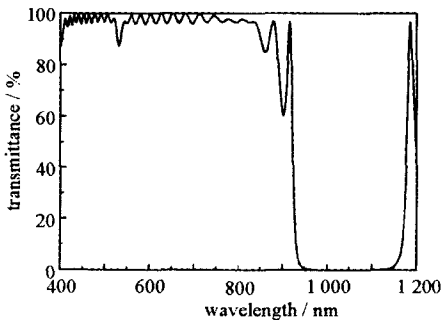


Fig. 4 Periodic error for film layer thickness on half-wave hole
图 4 膜层厚度周期性误差对半波孔的影响

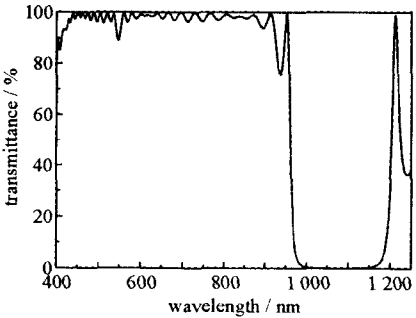


Fig. 5 Error for sensitive layer thickness on half-wave hole
图 5 敏感层厚度误差对半波孔的影响

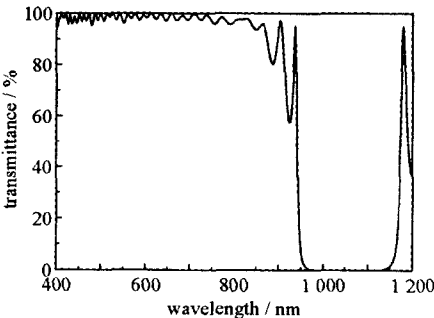


Fig. 6 Random error for all layers thickness on half-wave hole
图 6 所有膜层厚度为随机误差时对半波孔的影响

对于不同的膜系结构,膜料的色散及膜层折射率非均匀性对半波孔的影响也不相同,图 7 为在不同的膜系结构下膜料的色散因素对半波孔的影响,色散数值同表 1 和表 2。其中

膜系 1: $G/ (HL)^{13} H0.5L/ Air$

膜系 2: $G/ (HL)^{13} 0.5H0.5L/ Air$

图中细实线为膜系 1 的理论曲线,粗实线为膜系 2 的理论曲线。另外,图 8 为在上述膜系 1 和膜系 2 下膜层折射率非均匀性对半波孔的影响,图中细实线为膜系 1 的理论曲线,粗实线为膜系 2 的理论曲线。可以看出,半波孔的大小与膜系结构有关。

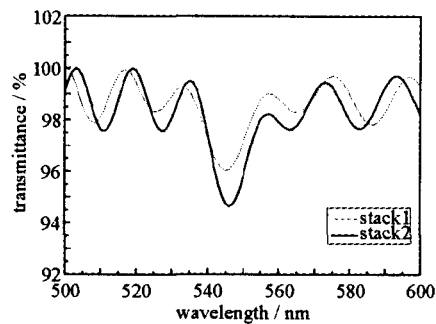


Fig. 7 Dispersion of film materials on half-wave hole under different film stacks

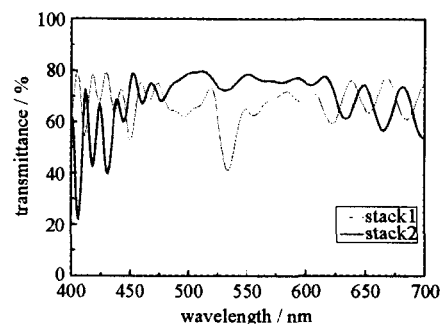


Fig. 8 Refractive index inhomogeneity of film layers on half-wave hole under different film stacks

以上各种导致半波孔产生的因素均可归因于在半波长处的导纳失配,即破坏了 $T = 1$ 的折射率条件。
对于 $\lambda_0/4$ 多层膜堆,通带内透射率 $T = 1$ 的波长处,多层膜的等效折射率 E_{equ} 等要满足以下条件:
设多层膜的等效折射率为 E_{equ} , η_{g} 和 η_{b} 分别是基底和入射介质的等效导纳,则当多层膜表现如同一个 $\lambda_0/4$ 层的那些波长处,膜系的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & i E_{\text{equ}}^{-1} \\ i E_{\text{equ}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{\text{g}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \eta_{\text{g}} / E_{\text{equ}} \\ i E_{\text{equ}} \end{bmatrix} \tag{1}$$

多层膜和基片的组合导纳为 $Y = C/B = E^2/\eta_{\text{g}}$ 。而由公式^[5]

$$T = \frac{4\eta_{\text{b}}\eta_{\text{g}}}{(\eta_{\text{b}}B + C)(\eta_{\text{b}}C + B)^*} = \frac{4\eta_{\text{b}}\eta_{\text{g}}\eta_{\text{equ}}^2}{(\eta_{\text{b}}\eta_{\text{g}} + E_{\text{equ}}^2)^2} \tag{2}$$

当 $T = 1$ 时,有 $(\eta_{\text{b}}\eta_{\text{g}} - E_{\text{equ}}^2)^2 = 0$,即 $E_{\text{equ}}^2 = \eta_{\text{b}}\eta_{\text{g}}$ 。

同理可推知,当多层膜表现如同一个 $\lambda_0/2$ 层的那些波长处,若 $\eta_{\text{b}} = \eta_{\text{g}}$,有 $R = 0, T = 1$ 。

2 实验及结果

膜系结构为 $G/2M2L2M2L(2H2L)^82HL/\text{Air}$,其中 M 为 ZrO_2 , H 为 TiO_2 , L 为 SiO_2 。为避免膜料的色散问题采用半波长控制,参考波长为 530 nm。其理论光谱曲线如图 9 所示。薄膜样品制备采用电子束蒸发及光电极值监控技术。为避免膜层折射率非均匀性问题,保持真空压强 3×10^{-2} Pa (充氧气)、衬底温度 300℃、膜料沉积速率等工艺因素稳定。其中膜料 ZrO_2 , TiO_2 和 SiO_2 的沉积速率分别为:0.5,0.8 和 1.2 nm/s。为避免光电极值监控技术所带来的膜层周期性误差积累效应,在镀膜过程中,适当地改变了某些层的走格回头量大小以破坏膜层厚度误差的周期性。实验测试曲线如图 10 所示,该法有效地消除了半波孔,只是通带有些小的波纹。需要指出的是样品背面没有加镀 532 nm 减反膜。

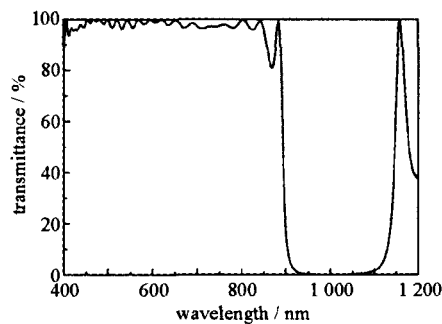


Fig. 9 Theoretical performance of harmonic beam splitter
图 9 倍频波长分离膜的理论设计曲线

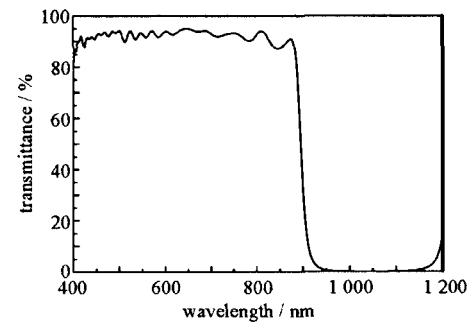


Fig. 10 Experimental performance of harmonic beam splitter with no half-wave hole
图 10 消除了半波孔的实验曲线

3 结 论

膜料的色散、膜层折射率非均匀性和膜厚控制误差积累等都是导致半波孔产生的因素,其中膜层厚度周期性误差积累和敏感层厚度误差是导致半波孔的主要因素,还指出了半波孔的大小与膜系结构有关。膜系设计参考波长采用半波长,避免了膜料的色散问题;而在镀膜过程中适当改变膜层厚度控制时的走格回头量大小,

避免了由光电极值监控法所带来的膜厚周期性误差积累效应;保持各工艺参数的稳定可以减小折射率非均匀性。最后制备出不带半波孔的光谱性能优良的倍频波长分离膜。

参考文献:

- [1] 姚建铨. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[J]. 世界科技研究与发展, 2002, 24(5): 1~10. (Yao J Q. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology[J]. *Worlds Research and Development of Science and Technology*, 2002, 24(5): 1~10)
- [2] 顾培夫. 薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1993. 162. (Gu P F. Thin Film Technology. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1993, 162)
- [3] 唐晋发, 顾培夫. 光学干涉薄膜[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1986. 102. (Tang J F, Gu P F. Optical Interference Thin Film[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1986. 101—102)
- [4] 王懿. DWDM 极窄带干涉滤光片的误差与自动补偿效应[J]. 应用光学, 2004, 25(1): 46 - 51. (Wang Y Z. Effect of error auto-compensation and error of the extremely narrow-band interference filter in DWDM system. *Appl Opt*, 2004, 25(1): 46-51)
- [5] 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1984. 229. (Tang J F, Zheng Q. Applied Thin Film Optics[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984. 229)

Elimination of the half-wave hole for harmonic beam splitter

MA Xiao-feng^{1,2}, YU Xiang¹, WANG Ying-jian¹, SHAO Jian-da¹, FAN Zheng-xiu¹

(1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,

P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The dispersion and refractive index inhomogeneity of film materials and error accumulation of layers thickness are all the factors that cause the half-wave hole for a harmonic beam splitter, among them the periodic error accumulation of layer thickness and sensitive layer error is the primary one. Furthermore, the stack structure is also related to the half-wave hole. With the aid of TFCALC the numerical calculations and theoretical analysis were performed. Measures are taken and a harmonic beam splitter was designed and fabricated. The half-wave hole was eliminated fundamentally. Both theoretical and experimental curves are given in this paper, which agree well with each other.

Key words: Harmonic beam splitter; Half-wave hole Dispersion; Refractive index inhomogeneity