

文章编号: 0258-7025(2005)03-0384-05

Ta₂O₅/SiO₂ 硬膜双腔滤光片激光损伤特性研究

高卫东, 黄建兵, 徐学科, 赵元安, 邵建达, 范正修

(中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜中心, 上海 201800)

摘要 研究了 Ta₂O₅/SiO₂ 硬膜双腔干涉滤光片带内、带边及带外的吸收和激光损伤特性。实验发现, 对于作用激光, 带通滤光片的驻波场分布、吸收率和损伤阈值在带内、带边和带外的响应特性对作用激光波长均呈现出明显的选择性。根据实验结果, 结合滤光片的驻波场分析, 给出了带通滤光片的损伤机理。

关键词 薄膜; 损伤阈值; 干涉滤光片; 弱吸收; 激光损伤机理

中图分类号 O 484.5 **文献标识码** A

Laser-Induced Damage of Ta₂O₅/SiO₂ Two-Cavity Narrow-Band Interference Filters

GAO Wei-dong, HUANG Jian-bing, XU Xue-ke,
ZHAO Yuan-an, SHAO Jian-da, FAN Zheng-xiu

(Research & Development Center for Optical Thin Films, Shanghai Institute of
Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The laser-induced damage threshold (LIDT) of Ta₂O₅/SiO₂ two-cavity narrow-band interference filters with different central wavelength was investigated with a Nd:YAG laser at 1064 nm under single-pulse mode, and the absorption measurement of such coatings was also performed by surface thermal lensing (STL) technique. It is found that the narrow-band interference filters showed different laser-induced damage behavior in the different zone (interband, band edge and rejection zone) of such coatings under high power laser irradiation. Using the electric distribution theoretical calculating, the experimental results have been analyzed in detail. The laser-induced damage behavior of such filters are in agreement with theoretical prediction.

Key words thin films; damage threshold; interference filter; weak absorptance; laser induce damage mechanism

1 引 言

在激光技术、卫星遥感探测以及目前正在飞速发展的光通信技术中, 干涉滤光片是非常重要的元件之一^[1,2]。从功能上讲, 它可以在一定波段实现光谱的分割, 使光束分成若干通道, 在光谱中获得所需要的波段。从结构上讲, 滤光片一方面需要对指定的波段尽可能高通; 另一方面, 则需要对其他波段尽可能高反^[3]。正是由于这种结构和功能上的独特性, 使得滤光片的激光损伤表现出非常独特的现象。在空间通信的若干应用中, 为了使滤光片的性能更加稳定可靠, 常常采用硬膜滤光片来代替软膜滤光

片^[4]。因此研究硬膜滤光片的激光损伤过程具有重要的学术意义和实践价值。

本文采用 TFCalc 膜系设计软件设计出了中心波长为 1064 nm 的双腔滤光片, 为了更好地抑制短波区, 在膜系的设计中, 通过增加反射带对短波截止区进行了延伸 $[0.81(\text{HL})^{14}(\text{HL})^4 2\text{H}(\text{LH})^{10}\text{L} 2\text{H}(\text{LH})^4]$ 。所设计的滤光片利用 Ta₂O₅/SiO₂ 在双射频(RF)离子束溅射镀膜机(VECCO)上进行镀制。随后采用表面热透镜技术测量了滤光片的吸收率, 并利用 Nd:YAG 调 Q 激光对滤光片进行激光损伤阈值的测量。根据实验结果, 通过驻波场理论对滤光片的

收稿日期: 2003-12-02; 收到修改稿日期: 2004-04-08

作者简介: 高卫东(1976—), 男, 河南漯河市人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事激光和材料方面的相互作用研究。E-mail: wdgao@mail.siom.ac.cn

电场的分析与模拟,探讨了滤光片的激光损伤机制。

2 样品制备

采用双射频离子束溅射镀膜机以 K9 玻璃为基底对实验样品进行镀制。溅射靶材分别为纯度为 99.999% 的 SiO₂ 和纯度为 99.999% 金属 Ta,用高纯 Ar 和高纯 O₂ 供给双射频离子源和靶材。真空室内本底真空为 4 × 10⁻⁵ Pa,制备过程中真空为 4.8 × 10⁻² Pa,烘烤温度为 136℃。膜层的物理厚度通过时间控制法来实现。镀制过程中,利用膜料分

子在空间的分布规律,从而获得了不同中心波长的带通滤光片。

3 结果与分析

3.1 透射曲线

利用 LAMBDA900 对制备的滤光片进行测量,测量其 400~1200 nm 的 0°透射,透射率曲线如图 1 所示,制备样品的中心波长、峰值透过率和半宽度列于表 1。

表 1 制备样品的中心波长、峰值透过率、半宽度

Table 1 Central wavelength, peak transmittance and half-width of filters

Sample number	Central wavelength /nm	Peak transmittance /%	Half-width /nm	Transmittance at 1064 nm /%	Poisiton of 1064 nm laser wavelength relative to passband
No. 1	1064	76.254	7	76.254	In
No. 2	1050	69.327	8	0.449	Edge
No. 3	1015	61.728	8	0.0196	Out
No. 4	978	57.402	8	0.0072	Out

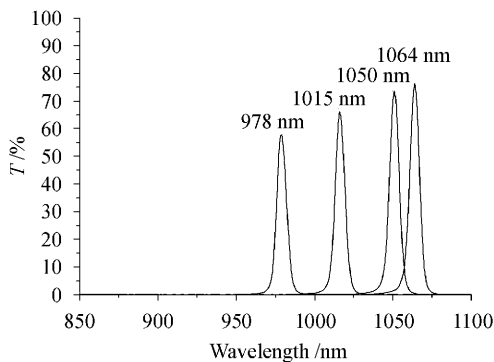


图 1 Ta₂O₅/SiO₂ 双腔窄带滤光片的 0°透射率曲线
Fig. 1 Measured transmittance spectra of Ta₂O₅/SiO₂ two-cavity narrow-band interference filters

3.2 带通滤光片的结构和电场分析——驻波场理论

3.2.1 带通滤光片的结构

对于全介质滤光片,从结构上又可以分为单腔和多腔滤光片。单腔滤光片又可分为两类:其结构分别为

$$A = (HL)^k H 2mL H (LH)^k,$$

$$B = (HL)^k 2mH (LH)^k,$$

均由反射层(HL)^k,间隔层 2mL 或 2mH 组成。其中 H 为高折射率材料,L 为低折射率材料,k 为反射层基本周期(HL) 的周期数,m 为干涉级次。其典型结构见图 2。

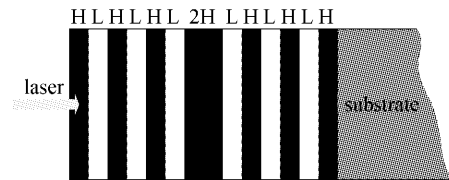


图 2 全介质带通滤光片的结构示意图
Fig. 2 Typical structure of one-cavity filter

多腔滤光片结构为: ALA...ALA, BLB...BLB 或者 A 和 B 的组合 ALB...BLA,而 A 和 B 的个数、次序不确定。其中 A,B 分别为上面定义的单腔滤光片,L 是用低折射率材料作为耦合层。

3.2.2 电场分析——驻波场理论

实验中的带通滤光片为法布里-珀罗型(F-P)滤光片,它的单个谐振腔在结构上可以看作是由两个反射板夹一层谐振层组成,而双腔和多腔滤光片则可通过单个谐振腔的叠加得到^[2,3]。对于单个谐振腔,设反射镜的反射系数为 r₁,透射系数为 t₁,则谐振腔的透射系数为

$$t = \frac{t_1^2 e^{-i\delta}}{1 + r_1^2 e^{-i2\delta}}, \quad (1)$$

其中 δ = 2πnd/λ,为谐振的相位差,n,d 分别为谐振层折射率和厚度,λ 为滤光片通带的中心波长。

设 E₁⁺,E₁⁻ 分别为光在谐振层内某一位置的正向电场和反向电场强度,E_t⁺,E_t⁻ 为在谐振层末端的

正向电场和反向电场,对半无穷基底,不考虑基底反射, $E_t^- = 0$, 则

$$\begin{bmatrix} E_t^+ \\ E_t^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t} \begin{bmatrix} e^{i2\delta_1} & r_1 e^{i2\delta_1} \\ r_1 e^{-i2\delta_1} & e^{i2\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t^+ \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1} \begin{bmatrix} e^{i2\delta_1} \\ r_1 e^{-i2\delta_1} \end{bmatrix} E_t^+, \quad (2)$$

设入射电场为 1, 则 $E_t^+ = t$

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1} \begin{bmatrix} e^{i2\delta_1} \\ r_1 e^{-i2\delta_1} \end{bmatrix} t, \quad (3)$$

δ_1 为从参考位置到谐振层末端的相位厚度。当谐振层满足谐振条件时, $\delta_1 = \pi, t = -1$, 有

$$E_1^+ + E_1^- = \frac{-1}{t_1} (e^{i2\delta_1} + r_1 e^{-i2\delta_1}), \quad (4)$$

由公式(4) 考查几个典型位置的场强($E_1^+ + E_1^-$):

1) 在谐振层的中间, $\delta_1 = \pi/2$, 若谐振层由高折射率材料构成, 则 r_1 为正, 场强度极小; 若谐振层由低折射率材料构成, 则 r_1 为负, 场强度极大。

2) 在谐振层的初端和末端, $\delta_1 = 0$ 或 π , 对高折射率谐振层, r_1 为正, 场强度极大; 对低折射率谐振层, r_1 为负, 场强度极小。

对带宽比较窄的滤光片, 为了提高鉴别率, $|r_1| \gg |t_1|$, 由式(4), 当谐振场取极大时, 谐振场强度极大值为

$$I_{\max} = |E_{\max}|^2 = |E_1^+ + E_1^-|^2 = \frac{1}{t_1^2} (1 + |r_1|^2), \quad (5)$$

$$t_1 \ll 1, E_{\max} \gg 1.$$

由驻波场理论可以得出: 1) 在带通滤光片的谐振腔内, 由于共振叠加, 会形成谐振场, 谐振场强度的极大值随两端反射板反射率 R 的增加而增加, $R \rightarrow 1$ 时, $|E| \rightarrow \infty$ 。2) 场强极大值发生的位置与谐振层的折射率有关。对高折射率的谐振层, 极大值发生在谐振层的两侧, 对低折射率的谐振层, 极大值发生在谐振层的中间。如果反射板与谐振层的界面相位差不为 π 或 0, 则极大值发生在驻波场干涉叠加的部位。

根据上面的分析, 对于双腔滤光片, 在谐振情况下, 将会出现两个谐振强场区和四个场强极大值。利用 TFCalc 膜系软件, 对实验中的滤光片进行驻波场的模拟计算, 参考波长为 1064 nm, 结果如图 3。

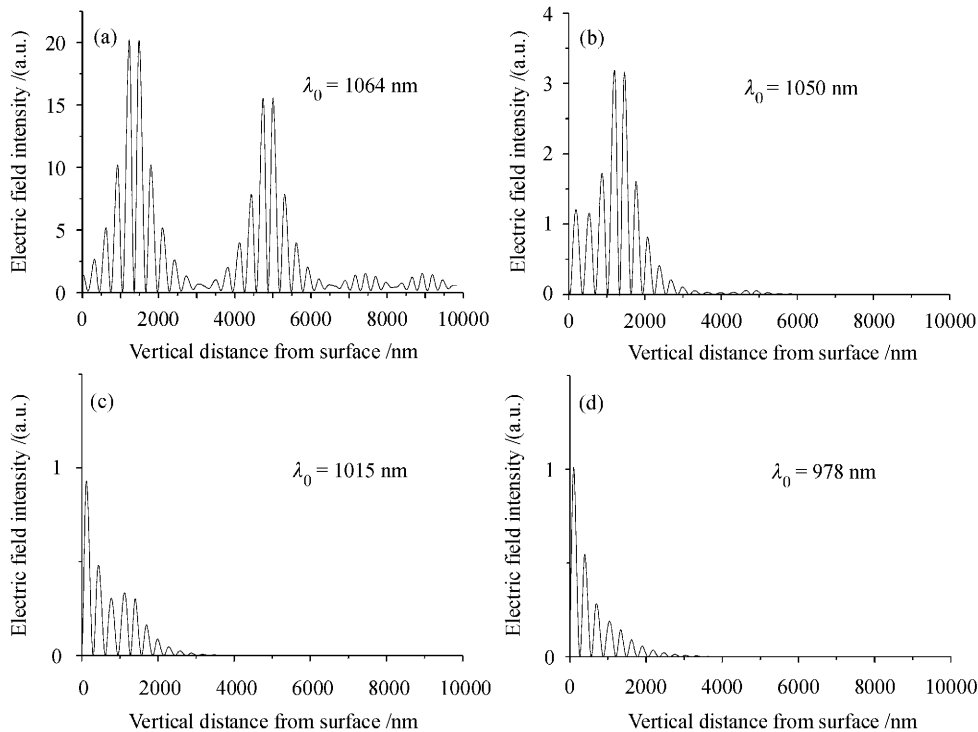


图 3 Ta_2O_5/SiO_2 双腔窄带滤光片的驻波场模拟

Fig. 3 Normalized standing electric field intensity distribution of all investigated Ta_2O_5/SiO_2 two-cavity narrow-band filters (central wavelength λ_0)

从模拟的结果来看, 在参考波长 1064 nm 下, 中心波长为 1064 nm 的滤光片出现明显的共振现象, 与理论分析结果完全一致。而中心波长为

1050 nm 的滤光片, 由于参考波长(1064 nm)落在其通带的边缘, 电场模拟的结果则表现为滤光片内驻波场的部分共振, 靠近入射媒质端谐振腔处的驻波

场产生比较强的共振,而靠近基底的谐振腔处的驻波场的共振现象则表现得非常弱。对于中心波长为 1015 nm 和 978 nm 的窄带滤光片,由于电场模拟的参考波长(1064 nm)处在其通带的带外,因此不能引起电场的谐振,电场模拟的结果表现为典型的高反膜的电场分布特性。由此可见,根据驻波场理论分析得到的结果跟滤光片的光谱特性是完全一致的。

3.3 滤光片的吸收测量

实验中,对薄膜的吸收测量,采用表面热透镜技术(STL technique)^[5~7]。测试中探测光经被测样品反射后由探测器接收,探测光中心光强的变化,反应了被测样品的弱吸收状况,在一定条件下,二者成线性关系。被测样品的吸收率的绝对值,可经过与已知吸收率的定标样品比较后得到。

实验中进一步对表面热透镜弱吸收装置的测量线路进行改进,提高整个测试系统的信噪比,使得测试的灵敏度达到 1×10^{-6} 。利用该装置对所制备的样品进行测量,测量结果如图 4。

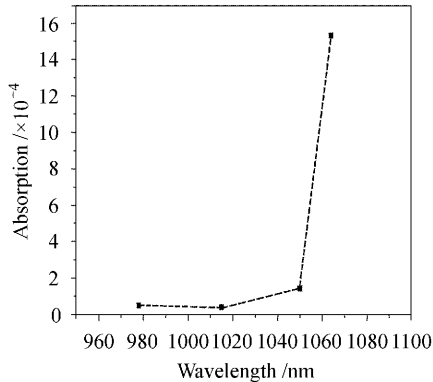


图 4 样品的弱吸收测量结果

Fig. 4 Representation of absorptance test data for Ta₂O₅/SiO₂ two-cavity narrow-band interference filters obtained at 1064 nm with STL technique

从弱吸收的测量结果来看,滤光片的吸收也存在明显的共振现象。对于中心波长在 978 nm 和 1015 nm 的滤光片,吸收率约为 50×10^{-6} ,随着滤光片的通带向计算波长靠近,滤光片的吸收也在逐渐增大,当滤光片的中心波长为 1015 nm 时,吸收率已经增大到 150×10^{-6} ,而此时的计算波长已经落在了其通带的边缘。当计算波长和滤光片的中心波长重合时,此时薄膜的吸收率达到最大值,为 1550×10^{-6} 。由于薄膜中的吸收率正比于薄膜的光学强度与吸收系数的乘积。根据前面的分析,不难

理解电场的共振必将导致薄膜吸收的共振。以上的弱吸收测试结果也证明了这一点。

3.4 滤光片损伤阈值的测量

薄膜损伤阈值(LIDT)测量装置是由 Nd:YAG 调 Q 激光器,He-Ne 准直光源,分光镜,聚焦凸透镜,两维可移动样品平台,CCD 和能量计组成,最后整套系统用电脑进行控制,如图 5 所示。

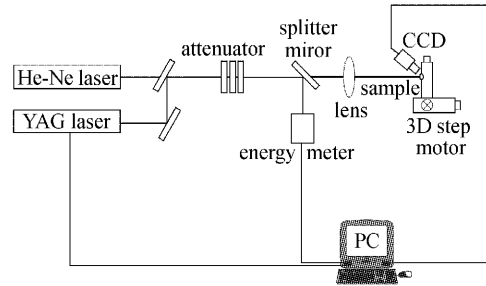


图 5 激光损伤阈值测量装置图

Fig. 5 Measure instrument of laser induced damage threshold

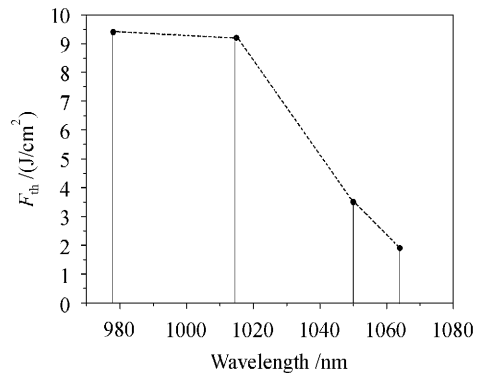


图 6 激光损伤阈值测量结果

Fig. 6 Representation of LIDT data for Ta₂O₅/SiO₂ two-cavity narrow-band interference filters obtained at 1064 nm

其中 Nd:YAG 脉冲激光器输出波长为 1064 nm,模式为 TE₀₀,脉宽(半峰全宽,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 $< \pm 5\%$ 。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 的作用方式进行测量,取 0 损伤几率时的能量密度作为样品的损伤阈值^[8~11]。测量结果如图 6 所示。

从滤光片的损伤阈值来看,在调 Q 的 1064 nm 脉冲激光作用下,中心波长为 978 nm 和 1015 nm 的滤光片具有较高的损伤阈值,分别为 $9.4 J/cm^2$

和 9.2 J/cm^2 , 对于中心波长为 1050 nm 的滤光片, 损伤阈值已经明显降低, 为 3.5 J/cm^2 , 当滤光片的中心波长和作用的激光波长重合时, 损伤阈值已经降到 1.9 J/cm^2 。根据前面的分析结果, 滤光片的损伤阈值的测量结果是可以理解的, 由于滤光片的电场存在强烈的共振现象, 而电场的共振又进一步导致滤光片吸收的共振。在相同的激光作用下, 吸收的共振又可以导致更多的能量的集聚, 在电场和温度场的综合作用下, 从而导致了损伤阈值的降低。

4 结 论

根据分析和实验结果可以看出:

1) 法布里-珀罗型带通滤光片由于具有独特的结构特性, 可以导致其电场的共振。当参考波长在通带内时, 电场将出现强烈的共振; 当参考波长处在通带边缘时, 滤光片的电场出现部分共振, 对于双腔滤光片, 靠近入射媒质的谐振腔的驻波场的共振比较强烈; 而当参考波长落在滤光片带外时, 滤光片的电场不发生共振, 驻波场场强的分布表现为典型的高反膜的驻波场分布特性, 场强峰值位于入射媒质。

2) 薄膜的吸收率正比于薄膜的光学强度与吸收系数的乘积, 电场的共振又可导致吸收的共振, 进而导致吸收的急剧增加。在表面热透镜弱吸收测量实验中表现为滤光片的吸收对抽运光波长的选择性。当抽运光落在滤光片通带外时, 滤光片具有较小的吸收; 当抽运光落在滤光片通带的边缘时, 吸收明显增加; 而当抽运光落在滤光片通带内时, 滤光片具有非常强烈的吸收。

3) 滤光片的激光损伤阈值也表现为对作用波长的选择性, 当作用波长落在通带中时, 滤光片的驻波场分布将出现明显的共振现象, 驻波场的分布进一步导致吸收的共振, 在电场和温度场的共同作用下, 导致滤光片的损伤破坏。

参 考 文 献

- 1 Fan Weixing, Chen Jianguo, Lu Yucun *et al.*. An external cavity semiconductor laser using a narrow-band filter as the tuning element [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(3):161~164
范卫星, 陈建国, 卢玉村等. 用窄带滤光片作为调谐元件的外腔半导体激光器[J]. *中国激光*, 1995, **A22**(3):161~164
- 2 H. A. Macleod. *Thin-Film Optical Filters* [M]. Third Edition. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001
- 3 He Yinbo, Xiong Jingyi, Wu Guozhong *et al.*. Research of double-pass polarization interference filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1):89~94
贺银波, 熊静懿, 吴国忠等. 双通偏振干涉滤光片的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1):89~94
- 4 Bai Shengyuan, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Optical stability of thin film filters [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5):576~580
白胜元, 顾培夫, 刘旭等. 薄膜滤光片的光学稳定性研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(5):576~580
- 5 Z. L. Wu, P. K. Kuo, Y. S. Lu *et al.*. Laser-induced surface thermal lensing for thin film characterizations [C]. *SPIE*, 1995, **2714**:294~304
- 6 Z. L. Wu, P. K. Kuo, R. L. Thomas *et al.*. Absorption measurement of thin films by using photothermal techniques; the influence of thermal properties [C]. *SPIE*, 1995, **2428**:113~122
- 7 Hu Haiyang, Fan Zhengxiu, Liu Ye *et al.*. Effect of impurities on laser induced damage to $1.06\mu\text{m}$ optical coatings [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(6):489~492
胡海洋, 范正修, 刘晔等. 杂质对光学薄膜激光损伤阈值的影响[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(6):489~492
- 8 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, 1995
- 9 Laser Induced Damage Threshold and Certification Procedures for Optical Materials [S]. NASA Reference Publication 1395, 1997
- 10 Li Zhongya, Cheng Lei, Li Chengfu. Study of laser damage of fused silica and sapphire crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):920~924
李仲伢, 程雷, 李成富. 熔石英玻璃和白宝石晶体激光损伤的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10):920~924
- 11 Liu Qiang, Lin Libin, Jiang Xiaodong *et al.*. Study on improving damage threshold of dielectric films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):637~641
刘强, 林理彬, 蒋晓东等. 提高氧化物介质膜层损伤阈值的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):637~641