

文章编号 : 1001-4322(2005)02-0191-06

窄带干涉滤光片抗击不同输出方式 激光的损伤特性研究*

高卫东, 贺洪波, 赵元安, 范正修, 邵建达

(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 : 利用 Nd: YAG 调 Q 单脉冲激光和自由脉冲激光对硬膜窄带干涉滤光片进行激光损伤阈值的测试, 并且采用表面热透镜技术测量了滤光片的吸收率。实验发现, 窄带干涉滤光片的吸收率和激光损伤阈值强烈依赖于辐照激光波长与窄带干涉滤光片通带的相对位置; 在调 Q 单脉冲激光作用下, 不同中心波长的滤光片损伤形貌存在明显的差别, 而在自由脉冲激光作用下, 各滤光片的损伤形貌则趋于相同, 均表现为典型的热熔烧蚀破坏。根据实验结果, 结合损伤形貌, 通过驻波场理论对激光作用下滤光片内电场分布的分析与模拟, 探讨了两种激光模式作用下滤光片的损伤特征和损伤机理的不同特点。

关键词 : 干涉滤光片; 激光损伤; 单脉冲激光; 自由脉冲激光

中图分类号 : O437 **文献标识码 :** A

在激光技术、卫星遥感探测以及目前正在飞速发展的光通讯技术中, 窄带干涉滤光片是非常重要的元件之一^[1-3], 但同时窄带干涉滤光片又是现代光学系统中比较脆弱的一种光学元件^[4]。一直以来, 薄膜的激光损伤都是一个非常活跃的研究领域, 人们在薄膜材料的选择、膜系设计、薄膜缺陷分析、沉积系统的改进以及损伤阈值的测试程序规范方面已经做了大量的工作, 并且取得了许多卓著的成效^[5]。研究窄带干涉滤光片的激光损伤特性^[6,7]对于探求窄带干涉滤光片的激光损伤机制, 进而实现对窄带干涉滤光片乃至整个光学系统的加固和防护都具有重要的指导意义和实用价值。

本文利用调 Q 单脉冲激光和自由脉冲激光对硬膜窄带干涉滤光片进行激光损伤实验研究, 结合滤光片的吸收率测量和损伤形貌, 通过驻波场理论对激光作用下窄带干涉滤光片内电场分布的分析与模拟, 深入探讨了两种激光工作方式作用下窄带干涉滤光片的损伤特征和损伤机理。

1 实验样品的设计和制备

首先利用 TFCalc 膜系设计软件设计了中心波长为 1 064 nm 的双腔窄带干涉滤光片, 为了更好地抑制短波区, 在膜系的设计中, 通过增加反射带来实现对短波截止区的延伸 14(0.81H0.81L) 4(HL) 2H 10(LH) L 2H 4(LH)]。然后以 K9 玻璃为基底, 采用 Ta₂O₅/SiO₂ 在双 RF 离子束溅射镀膜机上进行滤光片的镀制。镀制过程中, 通过改变监控波长的厚度, 从而获得了不同中心波长的窄带干涉滤光片。

2 实验结果与分析

2.1 透射曲线

利用 LAMBDA900 对制备的滤光片进行 400 ~ 1 200 nm 的 0°透射的测量, 所测透射率曲线如图 1 所示。

2.2 带通滤光片的结构和电场分析—驻波场理论

2.2.1 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滤光片和多腔滤光片。单腔滤光片又可分为两类: 其结构分别为 $A = n(HL) H 2mL H n(LH)$ 和 $B = n(HL) 2mH n(LH)$, 均由反射层 $n(HL)$, 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, n 为反射层基本周期(HL)的周期数, m 是干涉级次。其典型结构见图 2。

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 的组成的个数、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。

* 收稿日期 2004-03-15; 修订日期 2004-08-18

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者簡介: 高卫东(1976—), 男, 博士生, 主要从事激光与材料相互作用方面的研究; E-mail: wdgao@mail.siom.ac.cn.

表 1 制备的 4 种滤光片样品的中心波长、峰值透过率和半宽度
Table 1 Central wavelength, peak transmittance and half-width of filters

sample number	central wavelength /nm	peak transmittance/%	half-width/nm	transmittance at 1 064nm $T_{1.064}/\%$	position of 1 064 nm laser wavelength relative to passband
1	1 064	76.254	7	76.254	in
2	1 050	69.327	8	0.449	edge
3	1 015	61.728	8	0.019 6	out
4	978	57.402	8	0.007 2	out

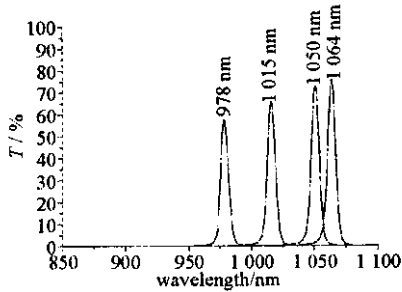


Fig. 1 Measured transmittance spectra of $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ two-cavity narrow-band interference filters

图 1 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 双腔窄带滤光片的 0° 透射率曲线



Fig. 2 Typical structure of one-cavity filter

图 2 全介质带通滤光片的结构示意图

2.2.2 电场分析

实验中的带通滤光片为法布里-珀罗型滤光片,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 r_1 ,透射系数为 t_1 ,谐振腔的透射系数为 t , $\delta = 2\pi nd/\lambda$ 为谐振的位相差, 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。则当谐振层满足谐振条件时 $\delta_1 = \pi$, $t = -1$,有

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

式中:设 E_1^+, E_1^- 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。由公式(1)可知: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;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,使 $|r_1| \gg |t_1|$,由式(1)可知,当谐振场取极大时,谐振场强度极大值为

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

由上面的驻波场理论可以得出: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的增加而增加,当反射率 $R \rightarrow 1$ 时, $|E| \rightarrow \infty$,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位相差不为 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,我们对实验中的滤光片进行驻波场的模拟计算,计算参考入射波长为 1 064 nm,结果如图 3 所示。

从模拟的结果来看,在入射波长 1 064 nm 下,中心波长为 1 064 nm 的滤光片出现明显的共振现象,与理论分析结果相吻合;中心波长为 1 050 nm 的滤光片,由于入射波长落在其通带的边缘,电场模拟的结果则表现为滤光片内驻波场的部分共振,即只有靠近入射媒质端的谐振腔处的电场才出现了比较强的共振,而中心波长为 1 015 nm 和 978 nm 的窄带滤光片,由于电场模拟的入射波长(1 064 nm)处在其通带外面,没能引起电场的谐振,二者的电场模拟的结果表现为典型的高反膜的电场分布特性。

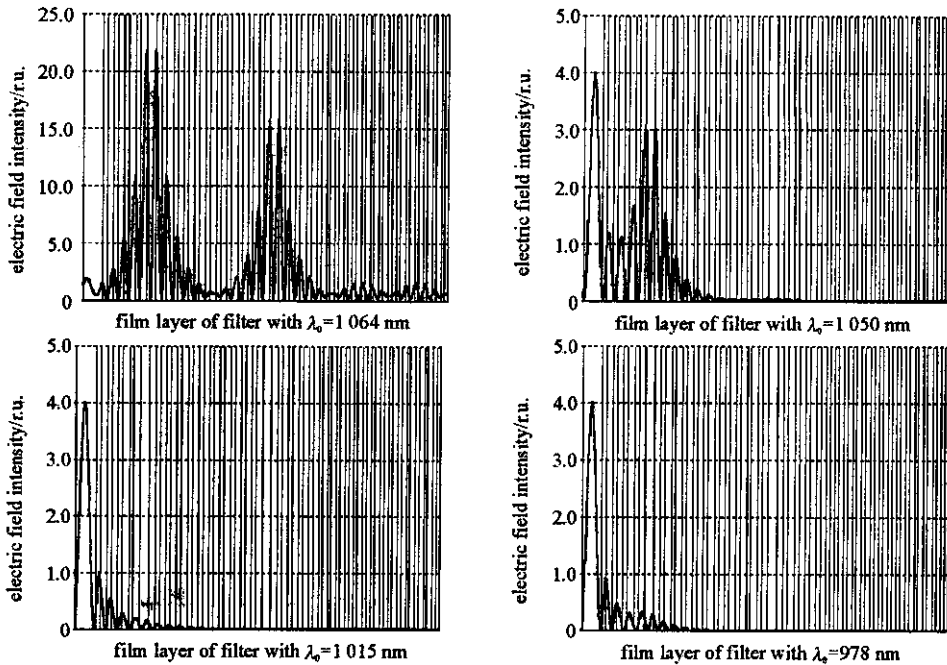


Fig. 3 Normalized standing electric field intensity distribution of all investigated Ta₂O₅/SiO₂ two-cavity narrow-band filters (central wavelength λ_0)

图 3 在 1 064 nm 激光作用下 ,Ta₂O₅/SiO₂ 双腔窄带干涉滤光片的驻波场模拟

2.3 滤光片的吸收测量

实验中,对薄膜的吸收测量,我们采用表面热透镜技术^[8,9](STL technique)。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,通过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,使得上面的装置的灵敏度达到 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 所示。

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 和 1 015 nm 的滤光片,吸收率约为 5.0×10^{-5} ,随着滤光片的通带向入射波长靠近,滤光片的吸收也在逐渐增大。当滤光片的中心波长为 1 015 nm 时,吸收率已经增大到 1.5×10^{-4} ,而此时的入射波长已经落在了其通带的边缘。当入射波长和滤光片的中心波长完全重合时,薄膜的吸收率达到最大值,为 1.55×10^{-3} 。这与滤光片的驻波场分析结果是一致的。由于薄膜的吸收率正比于薄膜的光学强度与吸收系数的乘积,显然,电场的共振必将导致薄膜吸收的增加。

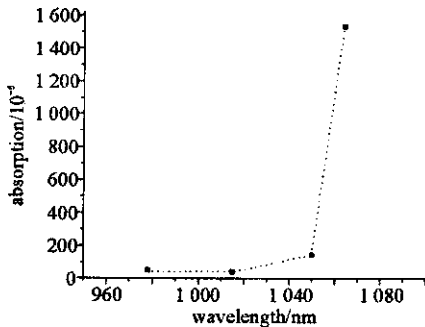


Fig. 4 Representation of absorbance test data for Ta₂O₅/SiO₂ two-cavity narrow-band interference filters obtained at 1 064 nm with STL technique

图 4 样品的弱吸收测量结果

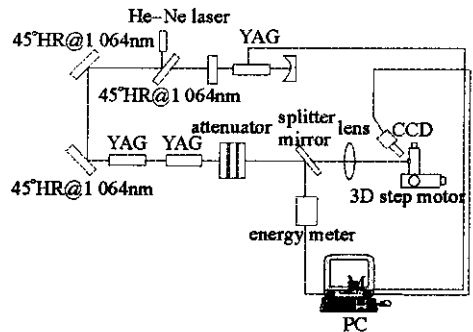


Fig. 5 Measuring instrument of laser induced damage threshold

图 5 激光损伤阈值测量装置图

2.4 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 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。

滤光片的激光损伤测试采用 1-on-1 的作用方式进行,取 0 损伤几率时的最大能量密度作为样品的损伤阈

值^[10]。激光工作波长 1 064 nm, 激光调 Q 方式输出时, 脉宽 12 ns, TEM₀₀, 激光输出能量为 50 mJ, 激光有效光斑直径 (1/e²) 为 406 μm, 峰值功率为 4.17 MW。激光自由脉冲方式输出 (即激光器不加调 Q, 为自由脉冲输出方式) 时, 总的脉冲宽度为 220 μs, 输出能量为 1.4 J, 有效光斑直径 (1/e²) 为 325 μm。所有的测试过程均采用增减衰减片来实现激光脉冲能量的调整, 同时每次测量都利用激光能量计实时监测脉冲能量。测量结果如图 6 所示。从滤光片的损伤阈值来看, 在调 Q 的 1 064 nm 脉冲激光作用下, 中心波长为 978 和 1 015 nm 的滤光片具有较高的损伤阈值, 分别为 9.4 和 9.2 J/cm², 对于中心波长为 1 050 nm 的滤光片, 损伤阈值已经明显降低, 为 3.5 J/cm²。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/cm²。在自由脉冲作用下, 窄带干涉滤光片的损伤阈值出现了相同的变化规律, 两者相比, 不同之处在于窄带干涉滤光片在自由脉冲作用下的能量密度损伤阈值要普遍比在调 Q 激光脉冲作用下的高出许多, 这主要应该归因于作用激光工作方式的不同: 一个属于短脉冲的高功率激光, 而另一个则为具有较高能量的长脉冲激光。这也表明, 在高功率激光作用下, 窄带干涉滤光片更容易发生破坏。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增加。在相同的激光作用下, 吸收的增加又可以导致更多的能量的集聚^[5], 在电场和温度场的综合作用下, 从而导致了窄带干涉滤光片在共振条件下损伤阈值的降低。

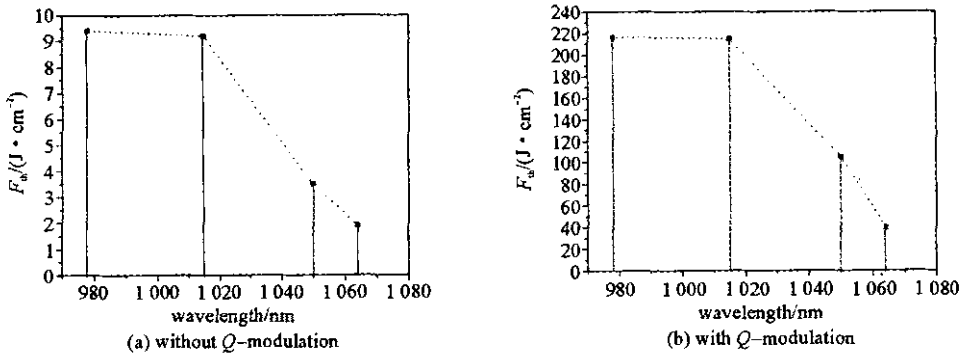


Fig. 6 Representation of LIDT data for Ta₂O₅/SiO₂ two-cavity narrow-band interference filters obtained at 1 064 nm

图 6 窄带干涉滤光片激光损伤阈值测量结果

2.5 滤光片的破坏形貌的观测

薄膜的破坏形貌能够直接反映其激光破坏的特性。实验中, 我们利用 Leica DMRXE 型偏光显微镜对滤光片的损伤形貌进行观测 (观测时显微镜的放大倍数为 200 倍), 发现中心波长为 978, 1 015 和 1 050 nm 的滤光片的损伤形貌主要呈现出高反膜的损伤特性, 并且损伤主要发生在缺陷处。图 7 (a)~7 (c) 依次是中心波长为 978, 1 015 和 1 050 nm 的滤光片的典型损伤形貌。而与之相比较, 中心波长为 1 064 nm 的滤光片的损伤形貌和前三者有明显的区别。我们认为, 在共振波长下, 窄带干涉滤光片的破坏主要是由于谐振吸收的作用造成的, 谐振吸收造成谐振层附近和滤光片与基底和表面之间巨大的温差, 巨大的温差势必会在谐振层周围产生强烈的热应力, 由此决定滤光片的破坏自谐振层附近开始, 并向两侧扩展, 与基底相比较, 由于表面层更为薄弱, 破坏便优先向表面发展, 进而膜层发生炸裂, 在破斑形貌上则表现为破斑中心大面积的脱落和边缘则出现明显的膜层破裂痕迹, 见图 7 (d)。

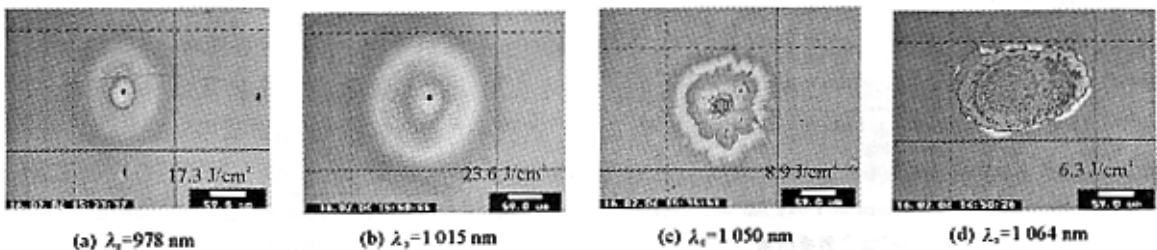


Fig. 7 Optical micrographs of typical damage of narrow band interference filters

(central wavelength, λ₀) with single pulse laser after a single shot

图 7 不同中心波长的滤光片在 1 064 nm 调 Q 单脉冲激光作用下的典型损伤形貌

同样利用 Leica 偏光显微镜对各个滤光片在自由脉冲激光作用下的损伤形貌进行观察, 研究中发现, 与调 Q 脉冲激光作用不同的是, 在自由脉冲激光作用下, 各个滤光片的破坏形貌均呈现出热熔烧蚀破坏的特征。在

相同能量的激光脉冲作用下,不同中心波长的滤光片的破斑形貌并没有明显的区别。下面以中心波长为 1 064 nm 的滤光片在不同脉冲能量作用下的损伤形貌为例,对窄带干涉滤光片抗击自由脉冲破坏的损伤形貌进行讨论。如图 8 所示,在较低能量下,滤光片出现小面积的烧蚀,随着激光输出能量的增大,烧蚀面积开始扩大,随着脉冲能量的进一步增大,进而产生大面积熔融烧蚀,产生薄膜材料的熔融烧蚀和喷溅,在膜层上形成熔融烧蚀的熔坑,直至最后整个烧蚀点的基底发生炸裂。

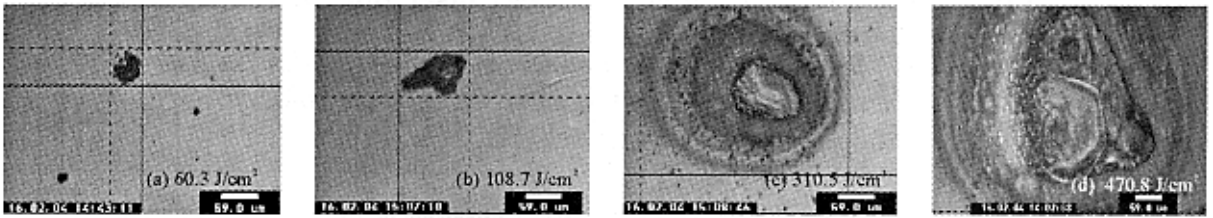


Fig. 8 Optical micrographs of typical damage of narrow band interference filters

(central wavelength, λ_0) with free pulse laser after a single shot with different energy density

图 8 1 064 nm 自由脉冲激光作用下,中心波长为 1 064 nm 的窄带滤光片随脉冲能量逐渐增加而呈现的典型损伤形貌

3 结 论

根据以上的研究结果,可以得出以下结论:窄带干涉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,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泵浦光波长的选择性,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内时,滤光片的驻波场将出现明显的共振现象,驻波场的共振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。从损伤形貌上来看,随着滤光片中心波长与作用激光波长的相对位置的不同,调 Q 激光对滤光片的损伤形貌具有明显的区别,当激光波长位于滤光片的带外和带边时,滤光片主要表现为高反膜的损伤特性,损伤往往起端于薄膜的缺陷处。当作用激光波长落在滤光片通带内时,滤光片则表现为明显的炸裂剥蚀破坏。而对于自由脉冲激光,损伤形貌随中心波长的变化则相当不明显,所有滤光片均表现为热熔烧蚀破坏。在较低能量下,滤光片出现小面积的烧蚀,随着激光输出能量的增大,烧蚀面积开始扩大,随着能量的进一步增大,进而产生大面积熔融烧蚀,在膜层上形成熔融烧蚀的熔坑,直至整个烧蚀点的基底发生破裂。

参考文献:

- [1] Lee J Y, Hahn J W, Lee H W. Spatiospectral transmission of a plane-mirror Fabry-Perot interferometer with nonuniform finite-size diffraction beam illuminations[J]. *JOSA A*, 2002, **19**: 5973.
- [2] Macleod H A. Thin-film optical filters[M]. Third Edition. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2001. 257—347.
- [3] Elsa G. Theory of quarter-wave-stack dielectric mirrors used in a thin Fabry-Perot filter[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(27): 5442—5449.
- [4] 袁永华,刘颂豪,孙承纬. Q 开关 Nd: YAG 脉冲激光对红外滤光片的损伤效应[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(5): 677—680. (Yuan Y H, Liu S H, Sun C W. Damage effects of Q-switched Nd:YAG laser beam on IR filters. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(5): 677—680)
- [5] 胡建平,邱服民,马平. HfO₂/SiO₂ 高反膜、增透膜及偏振膜的 1 064 nm 激光损伤特性[J]. *光学技术*, 2001, **27**(6): 507—511. (Hu J P, Qiu F M, Ma P. 1 064 nm pulse laser damage of hafnia-silica multilayer coatings. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 507—511)
- [6] Hu H Y, Fan Z X, Luo F. Laser-induced damage of a 1 064 nm ZnS/MgF₂ narrow-band interference filter[J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(12): 1951—1956.
- [7] 袁永华,刘颂豪,孙承纬. 连续激光辐照 ZnSe/MgF₂/K₉ 滤光片的透射特性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(4): 319—322. (Yuan Y H, Liu S H, Sun C W. CW laser-induced transmission change in ZnSe/MgF₂/K₉ filter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(4): 319—322)
- [8] Kuo P K. Laser-induced thermal lensing for thin film characterization[A]. *Proc of SPIE* [C]. 1995, **2714**: 294—304.
- [9] Wu Z L, Kuo P K, Thomas R L. Absorbance measurement of thin films by using photo thermal techniques; the influence of thermal properties

[A]. Proc of SPIE [C]. 1995 , 2428 :113—122.

[10] 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.

Laser-induced damage behaviors of Ta₂O₅/SiO₂ narrow-band interference filters under different laser output modes

GAO Wei-dong , HE Hong-bo , ZHAO Yuan-an , SHAO Jan-da , FAN Zheng-xiu
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of
Sciences , P. O. Box 800-211 , Shanghai 201800 , China)

Abstract : The laser-induced damage threshold (LIDT) and damage morphology of Ta₂O₅/SiO₂ narrow-band interference filters under single-pulse laser and free-running laser were investigated. The weak absorptance and the standing-wave fields of the filters have also been measured and analyzed. It was shown that narrow-band interference filters had unique laser-induced damage behaviors. All the filters exhibited a pass-band center dependent LIDT and absorptance behavior : LIDT of the samples decreased , as the sample ' s pass - band center was closer to laser wavelength 1 0 6 4 nm ; Absorptances of the samples increased as the sample ' s pass-band center was closer to laser wavelength 1 0 6 4 nm. Under single-pulse laser irradiation , the damage morphologies of the filters depended greatly on the irradiation wavelength ' s relative position to the passband , while in the case of free-running laser , there was no difference among the damage morphologies of different peak wavelength. According to experimental results and theoretical analysis , the laser induced damage mechanism of the filters has been given.

Key words : Narrow-band interference filters ; LIDT ; Single-pulse laser ; Free-running laser

万方数据
WANFANG DATA