

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0829-06

# 1064 nm 窄带干涉滤光片激光破坏研究

胡海洋<sup>1)</sup> 范正修<sup>1)</sup> 罗 福<sup>2)</sup>

(1), 中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜技术中心, 上海 201800)  
(2), 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 610900

摘要: 干涉滤光片由于内部谐振场共振吸收特性,其激光破坏过程有别于全反膜而具有特殊的性质。本文从谐振场及温度场理论出发,计算得出了 ZnS/MgF<sub>2</sub> 为主材料的滤光片的谐振场及温度场分布规律。在此规律指导下,对相同膜系结构的一系列滤光片的激光破坏阈值、吸收及破坏形貌进行了测量与分析,结合实验结果对干涉滤光片独具特色的破坏发展过程作出了描述,并给出了一定的解释。

关键词: 干涉滤光片;吸收;激光损伤阈值;表面热透镜技术

中图分类号: O437 文献标识码: A

## 1 引 言

滤光片的主要功能是在一定波段实现光谱分割,使光束分成若干通道,从而在多彩的光谱中获得所需的波段。简单的窄带干涉滤光片是根据法布里-珀罗多光束干涉制成的干涉膜系,它是由两个中心对称的多层介质反射膜系中间夹一层谐振层组成<sup>[1]</sup>。图 1 是谐振层为高折射率材料的典型干涉滤光片结构图。从图中可以看出,干涉带通滤光片从结构上具有反射膜的特性。但在谐振层内由于共振叠加而形成谐振场,所以它又具有不同于反射膜的特点,在较高激光能量辐照下,滤光片内谐振场的存在会造成共振吸收增强,从而导致滤光片的激光损伤并使其光性能失效。因滤光片的共振吸收特性,滤光片的破坏过程有别于全反膜。

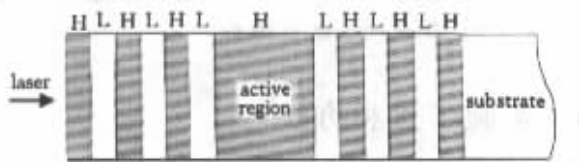


Fig.1 Schematic of interference filter construction. H and L stand for high and low-index films. Absorption of the laser beam occurs in the active region (spacer).

为了对滤光片的破坏特性增进了解,以滤光片内的谐振场及温度场理论为指导,采用 Nd:YAG 激光对以 ZnS/MgF<sub>2</sub> 为主材料的 1064 nm 滤光片进行了激光破坏阈值测试。并利用表面热透镜技术对这

一系列样品的吸收特性进行了测试。通过对破坏形貌的分析,发现这类滤光片的初始破坏不是发生在表面的膜层,而是最先发生在滤光片的谐振层附近,并伴随 ZnS 受热升华产生气泡。通过对薄膜驻波场及温度场的计算分析,对此进行了解释。

## 2 滤光片内的谐振场及温度场

### 2.1 谐振场分布

从结构上,滤光片可以简化为两个对称放置的反射层中间夹一层谐振层,设反射层的反射系数为  $r_1$ ,透射系数为  $t_1$ ,则滤光片的透射系数<sup>[1]</sup>

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

式中  $\delta = 2\pi nd/\lambda$  为谐振层的相位差, $n$ 、 $d$  分别为谐振层折射率和厚度, $\lambda$  为滤光片通带中心波长。

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, $E_t^+$ 、 $E_t^-$  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:

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1} \begin{bmatrix} e^{i2\delta_1} & r_1 e^{i2\delta_1} \\ r_1 e^{-i2\delta_1} & e^{i2\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t^+ \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1} \begin{bmatrix} e^{i2\delta_1} \\ r_1 e^{-i2\delta_1} \end{bmatrix} E_t^+ \quad (2)$$

$\delta_1$  为从参考位置到谐振层末端的相位厚度。设入射电场为 1,则  $E_t^+ = t$ ,

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

当谐振层满足谐振条件时,  $\delta_1 = \pi, t = -1$  有

$$E_1^+ + E_1^- = (-1/t_1) [e^{i2\delta_1} + r_1 e^{-i2\delta_1}] \quad (4)$$

由(4)式考察几个典型位置的场强,  $I = |E_1^+ + E_1^-|^2$ :

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, 场强极小; 若谐振层由低折射率材料构成, 则  $r_1$  为负, 场强极大。

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

对带宽比较窄的滤光片, 为了提高鉴别率,  $1 > |r_1| \gg |t_1|$ , 由(4)式, 当谐振场取极大时,

$$I_{\max} = |E_{\max}|^2 = |E_1^+ + E_1^-|^2 = \left[ \frac{1}{t_1} (1 + |r_1|) \right]^2 E_{\max} \gg 1. \quad (5)$$

由上可知, 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层反射率的增加而增加,  $r_1 \rightarrow 1$  时,  $I \rightarrow \infty$ 。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。如果反射层与谐振层的界面相位差不为  $\pi$  和  $0$ , 则极大值发生在驻波场干涉相加的部位。图 2 为采用驻波场理论计算所得干涉滤光片谐振场分布曲线, 其膜系结构为  $G(HL)^2H(LH)^4A$  (其中  $G:K_9$  玻璃,  $H:ZnS, L:MgF_2, A$ :空气)。

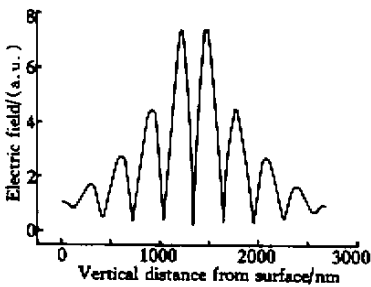


Fig. 2 Electric field distribution for ZnS/MgF<sub>2</sub> interference filter

### 2.2 温度场分布

薄膜的吸收是影响光学薄膜损伤阈值的重要因素, 其吸收正比于辐照薄膜的光强与吸收系数的乘积, 由于干涉滤光片谐振层中谐振场的急剧增加, 导致滤光片吸收的增加<sup>[2]</sup>, 这直接影响到滤光片在激光辐照下的温度场分布, 薄膜中的温度场可以由热传导方程及边界条件通过数值计算求得<sup>[3,4]</sup>:

$$C_i \frac{\partial}{\partial t} T(r, z, t) - K_i \nabla^2 T(r, z, t) = g_i(r, z, t), \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} T(r, z = 0, t) = \chi(r, z = 0, t), \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} T(r, z = \infty, t) &= T(r = \infty, z, t) = T_0, \\ T(r, z, t = 0) &= T_0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, 柱坐标系下  $r, z$  取向分别为膜层径向和纵深方向(由于旋转对称, 所以与  $\theta$  无关);  $C_i$  与  $K_i$  分别为第  $i$  层薄膜的比热与导热系数;

$\nabla^2 = [(\partial^2/\partial r^2) + (1/r)(\partial/\partial r) + (\partial^2/\partial z^2)]$  为圆柱坐标系下的拉普拉斯算子;  $\chi$  为膜层表面与空气进行热交换的表面热流系数, 对激光损伤而言, 其值一般为  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ ;  $g_i(r, z, t)$  定义为第  $i$  层膜内的单位体积能量吸收率;  $T(r, z, t)$  为  $t$  时刻相对环境温度。

图 3 是计算所得同图 2 相同膜系结构的 ZnS/MgF<sub>2</sub> 干涉滤光片温度场分布曲线(分别为一个激光脉冲辐照时间内, 8 ns、10 ns 时刻的温度场分布), 其它相关参数模拟损伤阈值温度实验条件:  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ , 脉冲宽度为 10 ns, 光斑直径为 1 mm, 输出能量为 100 mJ。

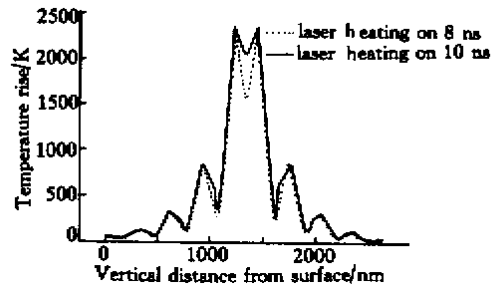


Fig. 3 Temperature field distribution for ZnS/MgF<sub>2</sub> interference filter. -----: Laser heating on 8 ns; — laser heating on 10 ns

## 3 实验装置和方法

### 3.1 样品制备

采用电子束蒸发技术制备了一系列对 1064 nm 波长激光分别为带内、带边及带外的窄带滤光片样品, 膜系结构为  $G(HL)^2H(LH)^4A$ , 通带带宽小于 5 nm, 170 °C 连续烘烤样品 3 h, 使薄膜结构发生微小变化而不易吸附潮气以增强薄膜在实验过程中的稳定性, 并使样品通带中心在烘烤过程中发生位移, 以达到所要求的不同通带特性, 如表 1 所示。

Table 1. The interference filters' transmitting index shifting after baking

sample	before baking	after baking for 3 hours under 170 °C			
	peak wavelength /nm	peak transmittance $T_{peak}/\%$	peak wavelength /nm	1064 nm transmittance $T_{laser}/\%$	the position of laser wavelength 1064 nm relative to pass-band
No.1	1063.5	66.0	1051.5	1.458	out
No.2	1059.8	65.8	1049.8	1.600	out
No.3	1064.2	65.0	1054.0	2.260	out
No.4	1065.3	64.0	1059.0	15.987	edge
No.5	1065.0	61.0	1062.4	29.420	edge
No.6	1068.8	64.1	1063.2	55.250	in
No.7	1070.2	63.8	1064.5	60.000	in

3.2 微弱吸收探测装置

采用表面热透镜技术探测薄膜的微弱吸收<sup>[5,6]</sup>实验装置如图 4 所示。输出为 1064 nm 连续激光束被一光学-机械调制器进行振幅调制成方波,占空比为 1:1 然后经过由一对衰减片组成的连续可调的功率调节器,最后由透镜聚焦至样品表面,光斑直径在 50 μm ~ 70 μm 可调(通过刀口法测量)探测光为 20 mW、632.8 nm He-Ne 激光,由正负透镜组成的透镜对会聚至样品表面(光斑直径 300 μm ~ 500 μm 可调),经样品表面反射后由一前置狭缝的单像限光电探测器接收,为防止抽运光源散射光的干扰,在探测器前放置只通过 632.8 nm 的干涉滤光片,信号最后送到锁相放大器与从调制器送来的标准参考信号进行相关运算放大。该信号在一定范围内正比于样品的吸收率<sup>[7]</sup>,与已知吸收率的定标样品比较后得到被测样品吸收的绝对值。

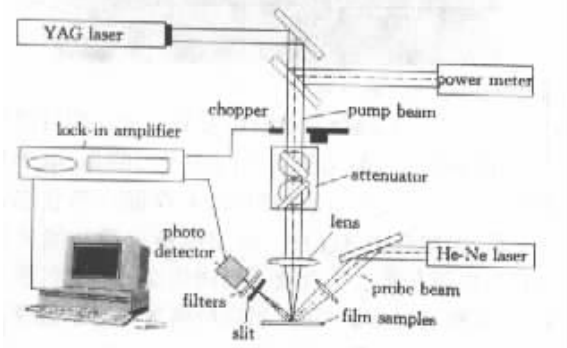


Fig.4 Experimental setup for measuring weak absorption of thin film using surface thermal lensing technique

3.3 损伤阈值的测量

采用辐射一次换个位置的方式进行激光损伤实验,实验装置如图 5 所示。调 Q Nd:YAG 激光器输出 TEM<sub>00</sub> 模式,波长 1064 nm,脉冲宽度 10 ns,激光能量呈高斯分布。入射光经一焦距 210 mm 消像差非球面透镜聚于样品表面。用减光滤光片衰减靶面能量,测量逐级衰减的光斑尺寸得到靶面能量分布曲线,对该曲线进行高斯拟合,而得到其高斯腰即靶

面聚焦的光斑直径<sup>[11]</sup> $d = 1$  mm。样品安置在三维调整架上,由计算机控制驱动。He-Ne 激光作为准直光源与主激光束同轴,薄膜损伤阈值定义为损伤出现几率为 0% 的最大入射能量密度( J/cm<sup>2</sup> )<sup>[1,2]</sup>。

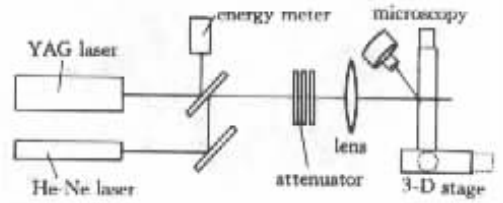


Fig.5 Experimental layout for laser damage measurement

4 测试结果与分析

4.1 损伤阈值与吸收

损伤阈值和吸收测试结果如图 6 所示,横坐标表示不同通带中心波长的样品。从图中可以看出,

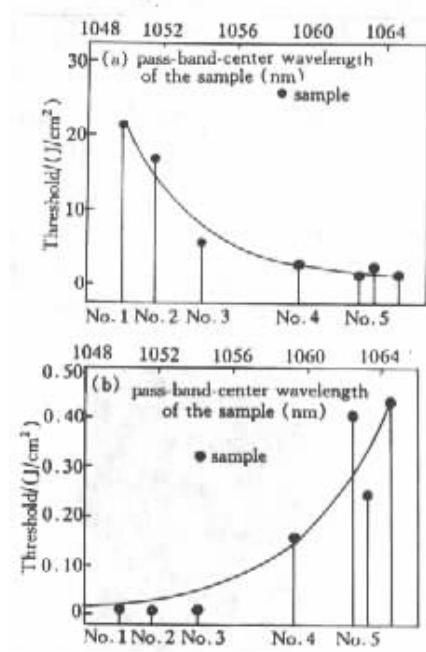


Fig.6 Representation of laser induced damage threshold (a) and absorption (b) test data obtained for 1064nm

样品的吸收和损伤阈值同各样品的通带特性有着很好的对应关系,通带中心越靠近 1064 nm(即损伤和吸收测试激光波长)的样品,其吸收越大,损伤阈值越低。这一点正好说明通带内存在很强的谐振场,而谐振场的共振叠加造成共振吸收的增强,从而降低了滤光片的损伤阈值。对上述两种趋势进行拟合获得的曲线,表明了吸收和阈值具有非常好的对应关系。

#### 4.2 损伤形貌分析

图 7 为通带中心在 1064 nm 附近的滤光片破坏

区域的光学显微照片。图 7(a)显示初始破坏呈现气泡状破坏斑;图 7(b)显示中心强区已呈现小面积膜层脱落,其边缘有环状彩虹条纹;图 7(c)、(d)为强破坏区域及其边缘部分的形貌;其损伤未呈现类似全反膜从强区到边缘逐层破坏迹象,而是在中心强区出现膜层大面积脱落,且边缘区域没有出现分层撕裂痕迹,而呈现环状彩虹条纹。从图 7 中可以看到,无论膜层脱落处还是边缘彩虹条纹区都有小气泡分布,而这一点在我们以往的高反膜损伤实验中都未曾发现。

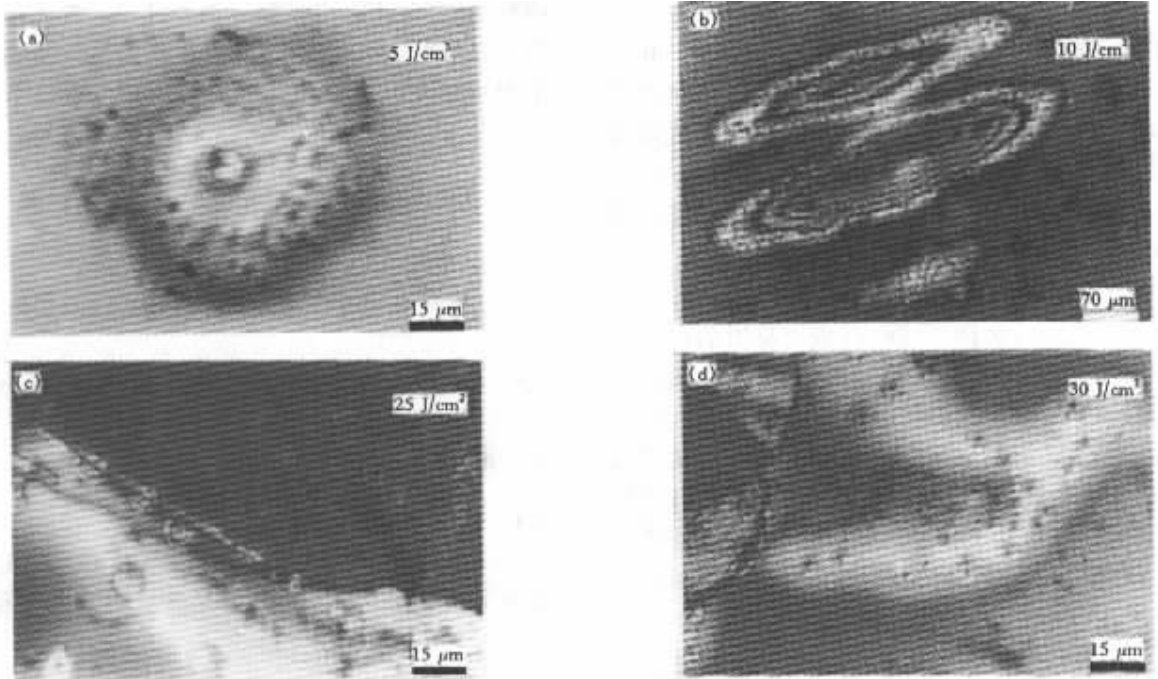


Fig.7 Optical micrography of typical damage after a single shot

同一样品大面积膜层脱落区域及其边缘电子扫描显微(SEM)照片如图 8 所示。其中图 8(a)为膜层脱落中心区域内的形貌,图 8(b)为中心区域外围部分,图 8(c)为膜层脱落区域外围部分的表面形貌。从图中可以很明显地观察到上层薄膜脱落后存留的气泡分布:即中心处气泡排列非常紧密,而边缘

处气泡排列相对疏散。且可以看到气泡炸裂后的裂纹(如图 8(b))。与光学显微照片不同的是,电子显微照片只能呈现样品表面形貌,对样品内部状态无法显示,因此在图 8(c)中,膜层脱落外部边缘区域没有观察到在光学显微镜下相同位置出现的气泡及条纹,由此可以推测所有(膜层脱落区域与膜层脱落

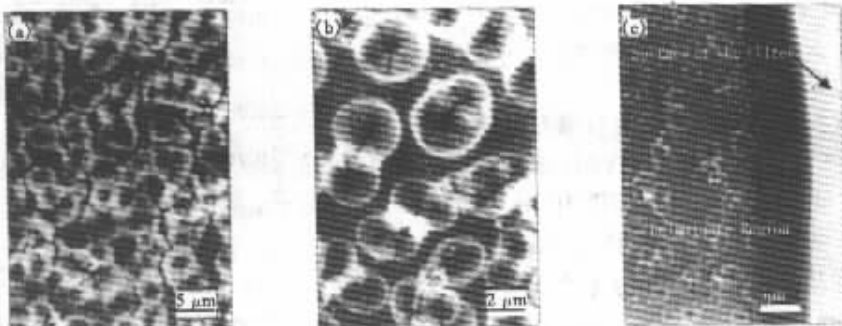


Fig.8 SEM micrography of typical damage after a single shot

区域外围部分)的气泡都发生在相同的位置,不是在样品表面,而是在膜层内部。只是由于上层未脱落膜层的掩盖使得边缘处的气泡无法在电子扫描显微镜下观察到。

由上所述,可以初步认为产生在膜层内部的气泡是导致滤光片出现大面积膜层脱落破坏的起因。为了证实这一观点,我们采用轮廓仪对上述损伤区域作了进一步探测。通过对不同能量激光辐照下产生的膜层脱落破坏区域扫描发现,破坏深度(即膜层脱落厚度)大致都为 1680 nm,所不同的只是破坏斑大小不同,选择其一示于图 9(a)。对初始破坏区域(即只观察到气泡及彩虹条纹的膜层未脱落区域)扫描,显示初始破坏出现的气泡对上层膜层产生鼓胀变形,鼓胀高度约为 180 nm,如图 9(b)所示。图 9(c)为上层薄膜开始胀裂区域的表面轮廓,显示部分气体溢出造成鼓胀变形高度下降为 30 nm。

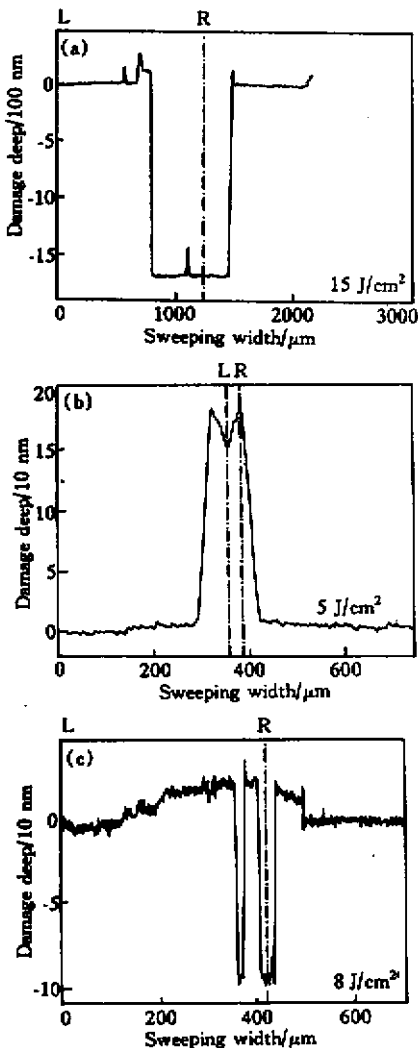


Fig. 9 The profile of the damage point tested. (a) Energy density of laser is 15 J/cm<sup>2</sup>; (b) Energy density of laser is 5 J/cm<sup>2</sup>; (c) Energy density of laser is 8 J/cm<sup>2</sup>

这些结果对我们所作的假设给予了很好的证明,即气泡产生于膜层内部,初始情况下,气泡只使得上层膜产生膨胀变形,随着破坏进一步加深,上层膜开始胀裂,最后导致大面积脱落破坏的形成。

#### 4.3 分析

首先由于滤光片内部谐振场的共振叠加造成中心谐振层高折射率材料 ZnS 膜层共振吸收的增强,根据光学薄膜温度场模拟计算结果(如图 3)所示表明在激光辐照下,温度场在中心 ZnS 谐振层内可能达到最高值(约 2000 K),在此温度下 ZnS 产生升华,由固体直接转化为气体,由此产生气泡。气泡膨胀对上层膜层产生热应力形变,在初始状态,升华气体产生的气泡数量及气泡内的压强都较小,且形变不足已膨破外层薄膜,该形变造成了光学显微照片的彩虹状干涉条纹;当激光辐照强度增大并达到一定的程度,大量 ZnS 气体产生,并开始撑破表面膜层,部分 ZnS 气体溢出,变形高度下降,最后随着激光强度进一步增大,气泡将在辐照区域大量产生并使得上层薄膜开始整片脱落,从而在脱落区域边缘产生明显的撕裂痕迹。

结论 实验表明,由于谐振场共振叠加的存在,干涉滤光片的损伤具有独特的性质:谐振场的共振叠加造成共振吸收的增强,降低了滤光片的损伤阈值,损伤最初出现于膜层内部的中心谐振层;中心谐振层材料的气化造成薄膜应力变形,最终导致上层薄膜的脱落。

中国科学院上海光学精密机械研究所刘晔高工对样品的测量给予了极大的帮助和悉心指点,美国底特律 Wayne State University 赵强博士对文中计算工作给予了大力支持,在此作者特致以谢意。

#### 参 考 文 献

- [1] Macleod H A. *Thin-Film Optical Filters*. New York: Adam Hilger Ltd., 1969. 154 ~ 199
- [2] Abraham E, Ogilvy J M. Heat flow in interference filter. *Appl. Phys. (B)*, 1987, **42**(1): 31 ~ 34
- [3] Bartholomew B J. Laser-induced surface heating. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(3): 1066 ~ 1072
- [4] Mansuripur M, Neville G A, Goodman J W. Laser-induced local heating of multilayers. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(6): 1106 ~ 1114
- [5] Franko M, Tran C D. Analytical thermal lens instrumentation. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(1): 1 ~ 18
- [6] Wu Z L, Kuo P K, Thomas R L *et al.*. Absorption measurement of thin films by using photothermal

- techniques: The influence of thermal properties. *Proc. SPIE*, 1995, **2428**:113 ~ 114
- [ 7 ] Hu Haiyang, Fan Zhengxiu, Liu Ye. Measuring weak absorptance of thin film coatings by surface thermal lensing technique. *Laser Physics*, 2000, **10**( 2 ): 633 ~ 681
- [ 8 ] Matthias E, Siegel J, Petzold S *et al.*. In-situ investigation of laser ablation of thin film. *Thin Solid Films*, 1995, **254**( 1 ):139 ~ 146
- [ 9 ] Stewart A F, Guenther A H. Laser-induced damage: Introduction. *Appl. Opt.*, 1984, **23**( 21 ) 3741 ~ 3752
- [ 10 ] Walker T W, Guenther A H, Nelsen P E. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings——part I: Experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**( 10 ) 2041 ~ 2052
- [ 11 ] 胡海洋 范正修. 杂质对 1.06  $\mu\text{m}$  激光薄膜损伤阈值的影响. *中国激光*, 1999, **A26**( 6 ):489 ~ 492

## Laser Induced Damage of 1064 nm ZnS/MgF<sub>2</sub> Interference Filter

Hu Haiyang<sup>1)</sup> Fan Zhengxiu<sup>1)</sup> Luo Fu<sup>2)</sup>

( 1 ), *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*

( 2 ), *Institute of Hydro-Physics, The Chinese Academy of Physical Engineering, Mianyang 610900*

( Received 15 March 2000 ; revised 15 June 2000 )

**Abstract:** Due to the resonant absorption of interference infrared filters at high power density laser radiation, the laser damage properties of such coatings are significantly different from the high reflective coatings and antireflective coatings. In order to understand the damage behavior of this type of coatings, a series of experiments have been done. The damage threshold for several infrared filters composed of multilayer of ZnS/MgF<sub>2</sub> were determined by irradiation from Nd:YAG laser. The absorption measurements of such coatings have been performed by the surface thermal lensing (STL) technique. The relationship between damage morphology and damage growth has been studied in detail. The empirical data is compared to theoretical predictions. The interesting phenomena are that most of the initial damage occurs not at the surface layers but inside of the multilayer films, where ZnS is sublimed to form many little air bubbles. Using the electric distribution and temperature field distribution theoretical calculating, the explanation is given. It is concluded that the laser damage properties of such infrared filters are in agreement with theoretical prediction.

**Key words:** interference filter; absorption; laser-induced damage; surface thermal lensing technique