

文章编号: 1001-4322(2002)05-0677-04

# Q开关 Nd:YAG脉冲激光对红外滤光片的损伤效应\*

袁永华<sup>1,2</sup>, 刘颂豪<sup>1</sup>, 孙承纬<sup>2</sup>, 罗福<sup>2</sup>, 范正修<sup>3</sup>, 廖常俊<sup>1</sup>, 胡海洋<sup>3</sup>

(1. 华南师范大学量子电子学研究所, 广东广州 100008; 2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900;  
3. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 介绍了由滤光片膜层结构决定的激光在光学薄膜中形成温度场及驻波场特性。用 1.06μm 调 Q-Nd:YAG 激光器, 在激光脉冲宽度 10ns 和光斑直径 0.61μm 的条件下, 进行了激光辐照红外滤光片的损伤特性实验研究。根据脉冲激光辐照红外滤光片后样品损伤分析, 发现滤光片的最初损伤发生在里面的膜层中, 从而在实验上验证了计算得到的滤光片膜层中存在其温度场及驻波场的结果。它对提高红外滤光片的抗激光辐照能力研究具有一定的参考价值。

**关键词:** 激光辐照效应; 红外滤光片; 光学薄膜; 温度场; 驻波场; 激光损伤

**中图分类号:** TN24 **文献标识码:** A

光学薄膜元件, 如反射镜、镀增透膜的光学元件和红外滤光片, 是红外光学系统的重要组成部分。一般, 光学薄膜的激光损伤阈值是光学元件裸表面损伤阈值的 1/2 ~ 1/4。所以, 光学薄膜的激光破坏以及抗激光破坏的问题已越来越突出<sup>[1~4]</sup>, 它一直是研究人员关注的热点问题。

除了薄膜材料对激光的吸收之外, 更应考虑到红外滤光片中驻波场的存在会引起共振吸收。为了研究激光对红外滤光片的损伤特性, 本文首先分析了红外滤光片内存在的温度场及驻波场分布, 从理论上说明了激光辐照红外滤光片的初始损伤不但包括红外滤光片表面膜层损伤, 而且还包括最初膜层破坏的发生不是在红外滤光片的表面膜层, 而是在内层的薄膜层首先引起破坏。它们的破坏特性与红外滤光片膜层结构的设计有关, 并且通过激光辐照红外滤光片的实验结果验证了这一现象。

## 1 激光辐照在光学薄膜中引起的温度场及驻波场

### 1.1 激光辐照在光学薄膜中引起的温度场<sup>[5,6]</sup>

在考虑薄膜的温度分布时, 假设激光光束是与广延方向无限大的凝聚态薄膜相互作用, 而且激光光束的横截面能量呈高斯分布。因此, 介质薄膜吸收的激光能量转化为膜料中的温度分布也可用高斯分布描述为

$$T(r) = T_M \exp(-\gamma r) \quad (1)$$

式中:  $T_M$  为光斑中心的最高温度;  $T(r)$  为距光斑中心距离为  $r$  处的温度;  $\gamma$  为透镜参数, 它与聚焦透镜实际通光口径、焦距和作用激光波长有关。

激光与光学薄膜相互作用的温度场可用求解三维固体中热传导的微分方程来给出。在假设  $K$ ,  $\rho$ ,  $C$  不随温度变化, 材料是均匀而各向同性的, 在初始时间  $t = 0$ , 初始温度  $T_0 = 0$ , 激光脉冲与光学薄膜作用的温度可作为点热源  $Q$  的传播过程来考虑, 温度场分布满足

$$T(R, t) = \frac{Q}{c(4\pi t)^{3/2}} e^{-\frac{R^2}{4t}} \quad (2)$$

式中:  $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , 是从点源  $O$  到任意点  $(x, y, z)$  距离的平方;  $K$  为导热系数 ( $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $c$  为比热容 ( $\text{J} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $\rho$  为密度 ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ );  $K/\rho c$  为热扩散系数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )。

### 1.2 激光在光学薄膜中引起的驻波场

激光具有良好的相干性, 当激光通过光学薄膜时, 不仅反射光束之间将发生干涉, 而且反射光与入射光之间也会产生干涉。这种相向进行的入射光与反射光束之间产生干涉叠加的结果是在薄膜中形成驻波。对多层薄膜而言, 激光在每层膜中都将形成驻波。

如设全部光学膜层的反射比为  $R$ , 应有  $E_0^- / E_0^+ = R$ , 可得第  $j$  层界面上的光场分布<sup>[7]</sup>

\* 收稿日期: 2001-10-10; 修订日期: 2002-04-24

基金项目: 国家 863 激光技术领域资助课题

作者简介: 袁永华 (1955-), 男, 研究员, 博士生, 研究方向为激光效应和光电子技术; 绵阳 919-113 信箱。

$$\begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix} = \frac{T_i}{(1 - \frac{2}{R_i})} \times \begin{bmatrix} -i & -i R_{(j-1)} \\ -i R_{(j-1)} & i \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -\frac{2}{R_i} \\ -R_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} E_0^+ \quad (3)$$

按照驻波场理论,驻波波腹处光强最大,因而对薄膜的破坏也从该处开始。考虑到驻波场的波腹并不一定位于膜层的表面,因而激光与光学薄膜作用的场效应将可能导致膜层从非表面某处开始破坏。而在开始破坏处,可由驻波波腹  $E_j$  与入射波  $E_j^+$  和反射波  $E_j^-$  的关系  $E_j = E_j^+ + E_j^-$ , 得到第  $j$  层界面上驻波场的相对强度分布为

$$\left( \frac{E_j}{E_0^+} \right)^2 = \left( \frac{T_j}{1 + R_j} \right)^2 \left( \frac{T_{(j-1)}}{1 - R_{(j-1)}} \right)^2 \cdots \left( \frac{T_1}{1 + R_1} \right)^2 (1 + R)^2, \quad j \text{ 为奇数} \quad (4)$$

$$\left( \frac{E_j}{E_0^+} \right)^2 = \left( \frac{T_j}{1 + R_j} \right)^2 \left( \frac{T_{(j-1)}}{1 - R_{(j-1)}} \right)^2 \cdots \left( \frac{T_1}{1 - R_1} \right)^2 (1 - R)^2, \quad j \text{ 为偶数} \quad (5)$$

对单层光学厚度为  $\lambda/4$  的膜系,如果令  $E_0^+ = 1$ , 此时膜系中光场分布矩阵满足

$$\begin{bmatrix} E^+ \\ E^- \end{bmatrix} = \frac{T}{1 - \frac{2}{R_0}} \times \begin{bmatrix} 1 & -i R_0 \\ -i R_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ R \end{bmatrix} \quad (6)$$

如膜料物质的折射率为  $n$ , 基底折射率为  $n_s$ , 则在膜层前、后表面的光强分布分别为

$$I_1 = (E^+ + E^-)^2 = [2n_s / (n_s + n^2)]^2 \quad (7)$$

$$I_2 = (E^+)^2 + (E^-)^2 + 2E^+ E^- \cos 2\delta = 2n / (n_s + n^2) \quad (8)$$

由方程(7)和方程(8)可以清楚地看出,对单层  $\lambda/4$  膜系,随着膜料折射率的变化,在膜层前后的光强分布也发生变化。膜层的破坏通常是由光强最强处开始的特点进一步说明:当  $n < n_s$  时,  $I_1 > I_2$ , 膜层中光场在前表面强度较大,破坏由前表面开始;当  $n > n_s$  时,  $I_1 < I_2$ , 光场在膜层的后表面强度较大,对应膜层由后表面开始损伤。

## 2 激光对红外滤光片的破坏的计算和实验结果

实验中红外滤光片样品膜系为: A(HL)<sup>4</sup>H(LH)<sup>4</sup>G, 其中 A、H、L 和 G 分别为空气、ZnS/MgF<sub>2</sub> 和 K9 玻璃。激光对滤光片的最初损伤主要取决于膜层中的温度场及驻波场, 图 1 给出在激光功率密度  $P_0 = 445.6 \text{ MW/cm}^2$  和  $t = 3 \text{ ns}$  条件下, 不同波长激光辐照滤光片膜层中计算温度分布的归一化对比, 表明不同波长激光对滤光片膜层中存在的驻波场特性导致了温度场的反常差异。从图 1 所示曲线 b 可以清楚地看出: 由于驻波场的作用, 表面膜层和基体/膜层界面处的温度是里面膜层的温度的十几分之一。图 2 给出在激光辐照红外滤光片功率密度  $P_0 = 16.33 \text{ MW/cm}^2$  条件下,  $t = 1 \mu\text{s}$  过程中滤光片膜层内计算的温度分布。图 1 和图 2 的结果说明: 膜层的结构决定了对入射激光能量的吸收和驻波场特性, 激光对滤光片膜层的最初损伤则发生在温度最高(波腹处光强最大)的膜层。表 1 给出滤光片样品的峰值波长  $\lambda_p$ , 峰值透过率  $T_p$ , 通带半宽度  $\Delta\lambda$ ,  $1064 \text{ nm}$  光谱透过率  $T_{1064}$  和激光透过率  $T_L$  的测量数据。

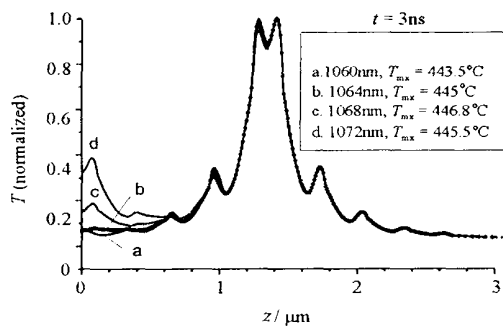


Fig. 1 Calculated temperature field distribution for ZnS/MgF<sub>2</sub> interference filter

图 1 不同激光波长下膜层中计算的温度场对比

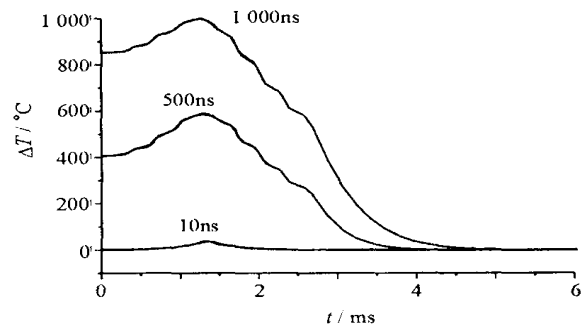


Fig. 2 Calculated curves of temperature vs time

图 2 激光辐照过程中膜层的温度分布

表 1 红外滤光片样品测量参数  
Table 1 Measurement data for IR filter

$p/\text{nm}$	$T_p/\%$	$\lambda/\text{nm}$	$T_{1064}/\%$	$T_L/\%$
1 047.8	62.9	5.2	1	1.44

激光对红外滤光片薄膜的斑点损伤特性取决于其自身的光学、热学和力学性能。实验中用波长  $1.06\mu\text{m}$  调 Q-Nd:YAG 激光辐照红外滤光片。在脉冲宽度  $10\text{ns}$ 、光斑直径  $0.61\text{mm}$  的条件下,得到其最大不损伤阈值  $30.03\text{mJ}$  和最小损伤阈值为  $19.75\text{mJ}$  的实验结果。图 3 给出激光辐照红外滤光片典型薄膜层强损伤区域的显微放大照片。图中清楚地表明:红外滤光片膜层最初的破坏不是发生在表面层,而是从薄膜的内膜层开始,并由局部的微小区域首先引起变化。由于强吸收造成薄膜内层汽化或破裂,形成强有力的膨胀波把上面的膜层顶得凸起,然后使其破裂,并发展成大面积的破斑。周围形成环状的由热变形引起的彩虹条纹。从图 1 和图 2 给出的激光引起红外滤光片膜层中温度场分布可以看出:由于驻波场的共振吸收作用,在红外滤光片的共振层附近温度很快上升,而表面和基体/膜层界面处的温度则不足百度,极大的温差使薄膜的破坏从共振层附近发生,即从驻波场波腹处(光强最大)附近开始,然后向两侧扩展。由于表面层约束较为薄弱,破坏优先向表面发展,并把共振层以上的膜层掀掉,破坏的痕迹便表现出断裂特征。破裂斑的层状结构表现出红外滤光片的膜系结构和驻波场结构。图 4 给出激光对滤光片薄膜初始破坏区域出现的气泡形貌,可以看出在断层底部布满亚微米量级的已经破裂的“气泡”,并且在气泡中心出现裂纹。局部小气泡破坏则说明薄膜的破坏最初是由强场区的杂质缺陷产生的,它是导致滤光片出现大面积膜层脱落的主要起因。

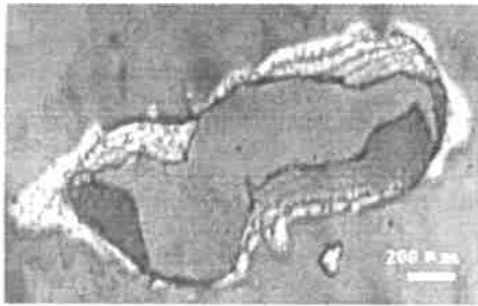


Fig. 3 Optical micrography of typical damage after a signal shot  
图 3 薄膜强损伤区域的形貌

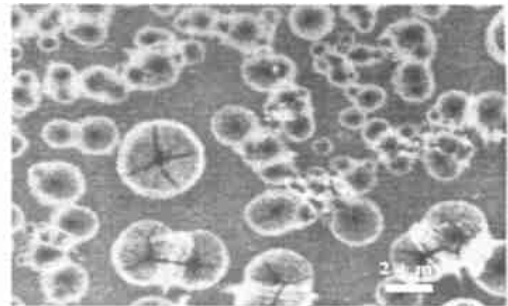


Fig. 4 SEM micrography of typical damage after a signal shot  
图 4 薄膜初始破坏区域出现的气泡

图 5 给出在膜层脱落的中心用干涉滤光片台阶仪测量的曲线,表明已损伤但没有开裂的样品辐照区域发生了表面隆起,即损伤区具有明显的层状结构,而底部则呈现平底断层。图 6 给出在上层薄膜开始胀裂区域用干涉滤光片台阶仪测量的曲线,说明部分气体溢出造成膨胀变形高度下降大约  $30\text{nm}$ 。这些结果说明:气泡产生于膜层内部,最初气泡只能使上层膜产生膨胀变形,随着破坏的进一步加剧,上层膜开始胀裂,最终导致大面积膜层脱落破坏的形成。

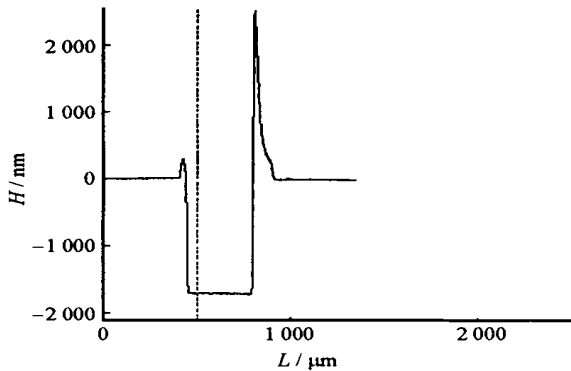


Fig. 5 Profile of the damage point tested  
图 5 测量薄膜损伤的深度

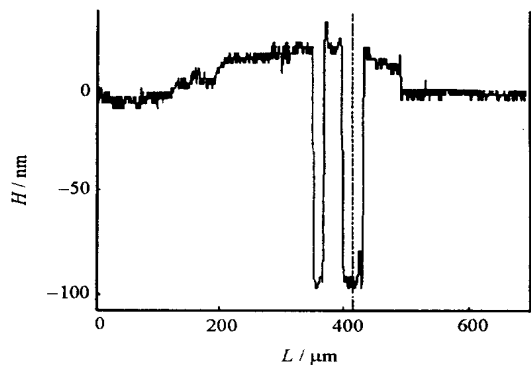


Fig. 6 Profile of the surface damage in thin-film  
图 6 上层薄膜开始胀裂区域的表面轮廓

### 3 结 论

通过激光在薄膜中形成的温度场及驻波场分析,以 ZnS/MgF<sub>2</sub> 为薄膜层,计算了滤光片的温度场及驻波场,并在此基础上进行了脉冲激光辐照滤光片样品后膜层的破坏形貌分析,得到如下初步结果:(1)计算结果表明:激光在薄膜中形成的温度场及驻波场主要取决于滤光片的膜层结构。由于驻波波腹处光强最大,所以激光对膜层的破坏也是从该处开始。考虑到驻波场的波腹并不一定位于薄膜表面,所以激光与光学薄膜作用形成的驻波场效应有可能使膜层从非表面某处的膜层开始破坏,而多层膜系中的光强分布还与膜系的层数有关。(2)对激光辐照后滤光片膜层损伤后的形貌进行仔细观察和测量,发现破斑的层状结构表现出滤光片的膜系结构及驻波场结构。而局部小气泡的破坏则说明了薄膜的破坏最初是由强场区的杂质缺陷造成的。因此,激光在膜层中诱发气泡是导致滤光片出现大面积膜层脱落的损伤原因。研究结果对改进红外滤光片的温度场及驻波场设计,提高红外滤光片的抗激光辐照能力研究具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] Walker T W, Guenter A H, Nielsen P E. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings-Part : Experimental and Part : Theory[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1981, **QE-17**(10):2041—2065.
- [2] Armon O, Baumeister P. Electric field distribution of laser damage in multilayers[J]. *Applied Optical*, 1980, **9**(11):1853—1855.
- [3] Welsch E, Ristau D. Photothermal measurements on optical thin films[J]. *Appl Opt*, 1995, **34**(31):7239—7253.
- [4] Zhao Q, Fan Z X, Wang Z J. Role of interface absorption in laser-induced local heating of optical coatings[J]. *Optical Engineering*, 1997, **36**(5):1530—1536.
- [5] 范正修. 光学薄膜的温度场设计[J]. 光学学报, 1995, **14**(4):463—467. (Fan Z X. The temperature field of optical film. *Acta Optica Sinica*, 1995, **14**(4):463—467)
- [6] Hu H Y, Fan Z X. Impurity effects on laser-induced damage[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, **26**(6):489—492.
- [7] 陆建, 倪晓武. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社, 1996. (Lu J, Ni X W. The physics of laser interaction with materials. Beijing: Mechanic industry press, 1996)

## Damage effects of Q-switched Nd:YAG laser beam on IR filter

YUAN Yong-hua<sup>1,2</sup>, LIU Song-hao<sup>1</sup>, SUN Cheng-wei<sup>2</sup>, LUO Fu<sup>2</sup>,  
FAN Zheng-xiu<sup>3</sup>, LIAO Chang-jun<sup>1</sup>, HU Hai-yang<sup>3</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences,  
P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The film structure determined temperature and standing wave field's characters which formed in laser irradiated optical thin film is presented, the temperature and standing wave fields is calculated for IR filter as an example. The research on damage characters in laser irradiated IR filter is proposed with 1.06 $\mu$ m Q-switched Nd:YAG laser with pulse duration of 10ns and spot diameter of 0.61mm. From the analysis to the laser damaged IR filter, it is discovered that the initial filter damage did occur in the inner layer, thus the experiment validated the calculated result of temperature and standing wave fields existed in filter. It is valuable to improve the IR filter's hardness against laser.

**Key words:** laser irradiation effect; IR filter; optical film; temperature field; standing wave field; laser damage