

# 激光对光学薄膜损伤的热冲击效应

龚辉 李成富 王明利

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 计算了薄膜在高功率脉冲激光作用下截面温度场和应力场分布。分析了热冲击在光学薄膜激光损伤中的作用,并用调Q 1.06 μm 脉冲激光对 ZrO<sub>2</sub> 单层膜损伤,讨论了不同激光强度下薄膜截面温度场与应力场分布,揭示了热冲击在 ZrO<sub>2</sub> 单层膜损伤中的机理和过程。

**关键词** 高功率脉冲激光,热冲击,激光损伤

## 1 引言

激光与薄膜相互作用的研究,一直引起激光工作者的关注,国内外进行了很多探讨,尤其是对强激光作用下光学薄膜的激光感生损伤研究,更是投入了大量人力物力,并已取得了一系列成果。但由于激光损伤的复杂性,尚有许多问题有待解决。

本文对高功率脉冲激光导致光学薄膜破坏的热冲击机制进行了研究,计算了在脉冲高功率激光作用下薄膜截面温度场和应力场的分布。分析了热冲击损伤过程,并实验研究了调Q 1.06 μm 脉冲激光对 ZrO<sub>2</sub> 单层膜的损伤,揭示了热冲击作用在 ZrO<sub>2</sub> 单层膜损伤中占主导地位。

## 2 热应力计算

### 2.1 温度场与应力场

由于高功率脉冲激光脉宽很窄(ns 量级),激光与薄膜作用时间很短,热传导作用对薄膜温度场的影响很小,温度场分布主要取决于光场分布。对于每层膜,膜厚很小,因此,我们主要计算截面温度场和应力场分布。考虑激光基模输出,场强轴对称分布,所以

$$I(r, t) = \frac{E_0}{2T\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right) \exp\left(-\frac{2(t-T)^2}{T^2}\right) \quad (1)$$

式中,  $r_0$  为焦斑半径( $1/e^2$ ),  $T$  为脉宽半宽度( $1/e^2$ ),  $E_0$  为脉冲激光能量。

假设薄膜热参数不随温度变化,不考虑薄膜表面散热,薄膜截面温度场分布为

$$T(r, t) = \frac{a \cdot \int_0^t I(r, t) dt}{h \cdot \rho \cdot C} + T_0 \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为膜吸收率,  $\rho$  为膜堆积密度,  $h$  为膜厚,  $C$  为薄膜热容,  $T_0$  为膜初始温度。

由于激光作用时间很短, 对于求解热应力时, 可以看作准静态变化, 因此热弹性位移势  $\phi$  为<sup>[1]</sup>

$$\phi = \frac{1+v}{1-v} K_s \beta \int_0^t T(r, t) dt + \phi_0 + t\phi_1 \quad (3)$$

式中  $K_s$  为热扩散系数,  $K_s = K_1/\rho \cdot C$ ,  $K_1$  为热传导系数,  $\beta$  为薄膜线膨胀系数,  $v$  为泊松比。  $\phi_0 = \phi_{t=0}$ 。设

$$K = \frac{1+v}{1-v} K_s \beta, \quad T_1 = \frac{\alpha E_0}{2h\rho C T \pi r_0^2}$$

当  $t \rightarrow 0$  时, 应力为 0, 因此  $\phi_0 = 0$ ; 考虑到当  $t \rightarrow \infty$  时,  $T(r, t)$  趋于稳定值, 由此知弹性位移势也应趋于某个与时间无关的极限值, 所以有

$$\lim(t \rightarrow \infty) \frac{d\phi}{dt} = 0$$

由此可得  $\phi_1$ , 因此对应于  $\phi$  的径向应力为

$$\delta_r = \frac{8G}{r_0^2} \left[ \frac{1+v}{1-v} K_s \beta T_1 \int_0^t \int_0^t \exp\left(\frac{-2(t-T)^2}{T^2}\right) \exp\left(\frac{-2r^2}{r_0^2}\right) dt dt - t K T_1 \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{r_0^2}\right) \right] \quad (4)$$

式中,  $G = E/2(1+v)$ ,  $E$  为薄膜杨氏弹性模量。考虑到激光与薄膜作用时间为 ns 量级, 因此 (4) 式变为

$$\delta_r = \frac{8G}{r_0^2} t K T_1 \cdot \exp\left(\frac{-2r^2}{r_0^2}\right) \quad (5)$$

径向应力  $\delta_r$  为压应力。

## 2.2 热冲击破坏机制

由于脉冲高功率激光对光学薄膜的急剧加热, 使其产生剧烈的温度变化, 产生冲击热应力。导致破坏的抵抗能力取决于薄膜的特性。我们知道几乎所有的, 无论用什么方法制备的膜, 都存在机械应力, 可分为张应力和压应力。如果膜倾向于平行于它的表面收缩, 则出现张应力; 压应力则是膜在平行于表面扩展时出现。在张应力情况下, 形成凹的膜表面, 在压应力情况下膜表面是凸的。机械应力由三个分量组成<sup>[2]</sup>,  $\delta = \delta_{ext} + \delta_{therm} + \delta_{intr}$ , 外应力 ( $\delta_{ext}$ ) 由外力作用引起, 热应力 ( $\delta_{therm}$ ) 由温度变化引起。在最不利的情况下, 总应力 ( $\delta$ ) 中的热应力部分可能是十分显著的。 $\delta_{intr}$  是薄膜本身的内禀应力, 它是一种结构的和微结构的灵敏性质, 由膜生长模式和微结构的相互作用造成的。对于研究机械应力来说, 膜与基底间附着力的减小是很重要的。膜与基底的附着力可如下分类: 物理吸附、化学吸附和化学键合。其附着力强度大约在  $10^4 \sim 3 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ 。在一般情况下, 膜的机械应力不危及附着力。但由于高功率脉冲激光对薄膜的热冲击作用, 造成很强的热冲击应力, 可使薄膜的机械应力发生很大变化, 克服附着力引起辐照区域的薄膜与基板分离。热冲击作用在激光导致薄膜破坏中很重要。由此可知, 利用激光对薄膜的剥离, 测量附着力是一种可行方法。

## 3 实验和结果

### 3.1 实验

在室温 (27 °C) 下, 实验测试了  $\text{ZrO}_2$  单层膜 (膜厚  $\lambda/4$ ,  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ), 基板为玻璃。实验装

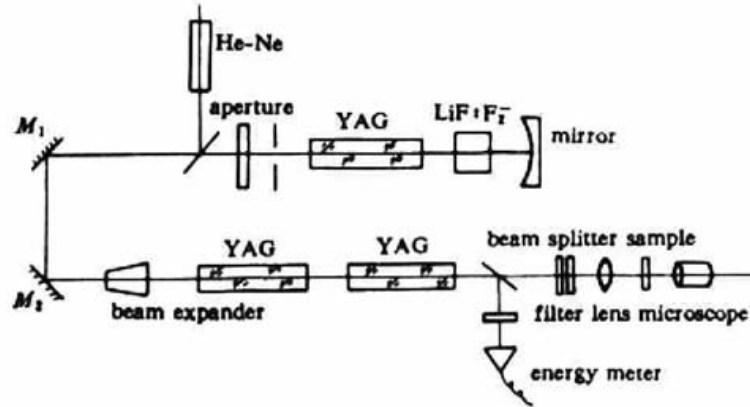
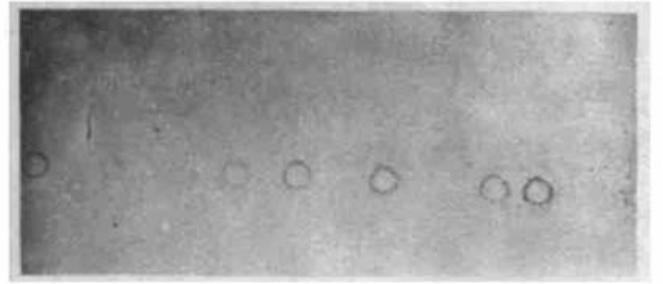


Fig. 1 Experimental apparatus

置如图 1 所示,一级振荡,二级放大。利用晶体调  $Q$ , 激光波长  $1.06 \mu\text{m}$ , 脉宽  $10 \text{ ns}$ , 输出为基模, 焦斑直径  $55 \mu\text{m}$  ( $1/e^2$ )。实验采用 1-on-1 方式损伤。实验中观察到损伤破坏时,膜层崩飞,成片剥落。图 2 为薄膜损伤形貌,损伤点成圆形剥落,损伤程度越大,损伤点半径越大。损伤点半径由 Leize 干涉显微镜测量,表 1 为不同入射激光能量下的损伤点半径测量结果, $\text{ZrO}_2$  薄膜损伤阈值为  $27.8 \text{ J/cm}^2$ 。

Table 1 Damage spot radius versus laser fluence

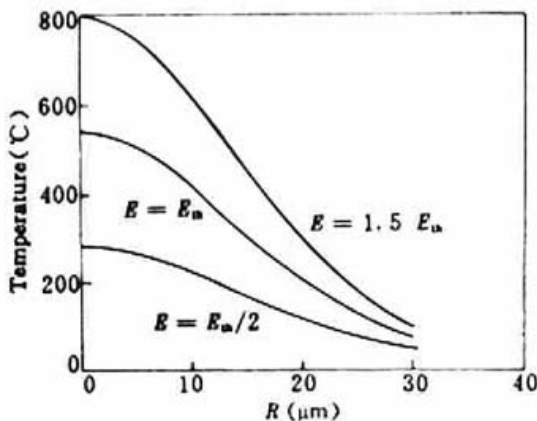
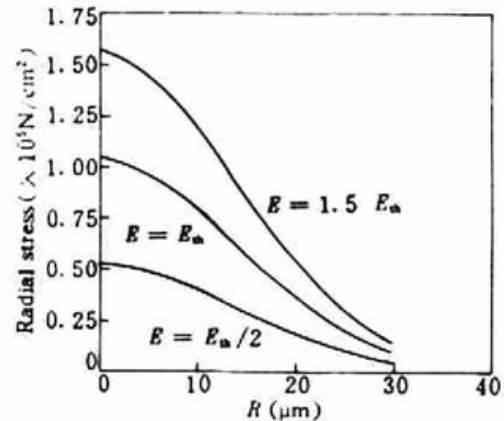
$E/E_{th}$	$R(\mu\text{m})$	$E/E_{th}$	$R(\mu\text{m})$
1.5	7.1	6	25.1
2.5	15.9	7.7	25.2
3	19.0	8.5	27.2
4.5	22.3	9.3	27.9

Fig. 2 Damage morphology of a  $\text{ZrO}_2$  single-layer film

### 3.2 数据分析

利用(2),(5)式,作出不同入射激光能量下

$\text{ZrO}_2$  单层膜截面温度场和应力场的分布,如图 3、图 4 所示 ( $t = 10 \text{ ns}$ ,  $E_{th}$  为损伤阈值)。从图

Fig. 3 Sectional temperature distribution of a  $\text{ZrO}_2$  single-layer film induced by a Q-switched  $1.06 \mu\text{m}$  laserFig. 4 Sectional stress distribution of a  $\text{ZrO}_2$  single-layer film induced by a Q-switched  $1.06 \mu\text{m}$  laser

3 中可以看到,在激光焦斑中心处温度最高,随着焦斑半径  $R$  的变大,温度迅速下降,形成很大梯度。不同入射激光能量下,温度峰值不同。激光入射能量为损伤阈值时,薄膜中心温度为  $550$

℃,而  $ZrO_2$  膜熔点为 2950 ℃,说明薄膜损伤不是热熔破坏,而是热应力损伤。由图 4 可见,径向应力  $\delta_r$  为压应力,在光斑中心区达到  $10^5 \text{ N/cm}^2$  量级,足以克服薄膜的附着力,造成薄膜脱落。

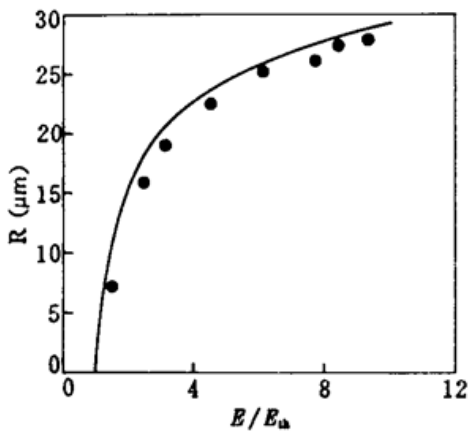


Fig. 5 Dependence of the damage spot radius on laser fluence

随着  $R$  的增加,  $\delta_r$  迅速降低。不同入射能量下,应力峰值不同,入射能量越大,达到薄膜剥落的热应力范围越大,即损伤区域变大。图 5 为激光入射能量与损伤点半径的关系曲线,图中实线为理论计算曲线,其中薄膜损伤应力值由损伤阈值能量下的应力最大值决定,可以看到理论计算值和实验结果相当吻合。

## 4 结 论

4.1 热冲击效应在高功率脉冲激光对光学薄膜损伤过程中起着重要作用,它产生的热冲击应力

很大,足以造成薄膜的破坏剥落。

4.2 虽然是利用单层膜损伤实验验证,但对于多层膜具有同样物理意义。

4.3 从以上计算分析中,可以看到减小薄膜热膨胀系数、增加热容、提高膜层附着强度等可以增强薄膜抗激光损伤强度。

4.4 激光对光学薄膜损伤过程是复杂多样的,损伤机理很多,但对于  $ZrO_2$  单层膜损伤中,热冲击作用占主导地位。

## 参 考 文 献

- 1 竹内洋一郎. 热应力, 北京: 科学出版社, 1982. 75~80
- 2 H. K. 普尔克尔. 玻璃镀膜, 北京: 科学出版社, 1988. 334~336

## Thermal Shock Effect on Optical Films Damage Induced by High Power Laser

Gong Hui Li Chengfu Wang Mingli

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** The sectional temperature and stress distribution of optical films under high power pulse laser irradiation are calculated. Thermal shock effect was analyzed. Experiment of damage induced by a Q switched 1.06  $\mu\text{m}$  laser to a  $ZrO_2$  single film reveals the thermal shock damage process and mechanism.

**Key words** high power pulse laser, thermal shock, laser damage