

文章编号: 1001-3806(2004)03-0255-04

## CO<sub>2</sub> 激光辐照下光学薄膜的温度场与热畸变

杨 富<sup>1,2</sup>, 黄 伟<sup>1,3</sup>, 张 彬<sup>1</sup>, 楚晓亮<sup>1</sup>, 刘志国<sup>3</sup>, 蔡邦维<sup>1</sup>

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064; 2. 河北北方学院 物理系, 张家口 075028; 3. 中国科学院 光电技术研究所, 双流 610209)

**摘要:** 介绍了光学薄膜温度场的基本理论, 利用交替隐型技术, 对 10.6 $\mu\text{m}$  激光辐照下介质薄膜的温度场分布进行了数值模拟和理论分析。在此基础上, 利用夏克-哈特曼波前传感器对介质基底样品、不同厚度的介质单层膜样品以及不同膜系的 YbF<sub>3</sub>/ZnSe 介质多层膜样品在 10.6 $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> 激光辐照下的热畸变进行了实验研究。研究结果表明, 激光辐照下光学薄膜样品的温度场分布与辐照激光的光场分布、激光功率以及激光的辐照时间等因素有关。对于 10.6 $\mu\text{m}$  激光而言, Ge 最适宜做基底材料。

**关键词:** 光学薄膜; 温度场; 热畸变; 10.6 $\mu\text{m}$  激光

**中图分类号:** O432.2; O484 **文献标识码:** A

### Temperature field distribution and thermal distortion of thin film coatings irradiated by CO<sub>2</sub> laser

YANG Fu<sup>1,2</sup>, HUANG Wei<sup>1,3</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, CHU Xiao-liang<sup>1</sup>, LIU Zhi-guo<sup>3</sup>, CAI Bang-wei<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Department of Physics, Hebei Northern College, Zhang Jiakou 075028, China; 3. Institute of Optics & Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Shuangliu 610209, China)

**Abstract:** The basic theory of the temperature field of optical thin films is given. The temperature field distribution of dielectric thin films irradiated by 10.6 $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> lasers has been simulated numerically and analyzed theoretically using alternating direction-implicit technique. Using the Shack-Hartmann wavefront sensor, the thermal distortion of the substrate, the single-layer dielectric thin films with different thickness, and the multi-layer dielectric thin films with different multilayer thin films (YbF<sub>3</sub>/ZnSe) irradiated by CO<sub>2</sub> laser are studied experimentally. It can be shown that the temperature field distribution of thin film coatings irradiated by lasers depends on the field distribution, power and irradiating time of lasers. For the 10.6 $\mu\text{m}$  laser, Ge is the most suitable substrate material.

**Key words:** optical thin films; temperature field; thermal distortion; 10.6 $\mu\text{m}$  laser

## 引 言

光学元件的温度场分布和热畸变与热吸收密切相关。一般来说, 热吸收越大, 其温升和热畸变也越大<sup>[1,2]</sup>。为了减小光学元件的吸收损耗, 制备出高质量的光学元件, 提高光学系统输出光束质量及其稳定性, 有必要对光学元件的温升和热畸变进行深入研究。迄今为止, 国内外有关连续波强激光辐照下薄膜光学元件的热吸收、热畸变及热损伤问题

的报道并不多。近年来, 随着高功率 CO<sub>2</sub> 激光器应用的日益广泛<sup>[3]</sup>。特别是国内外有关 CO<sub>2</sub> 激光大气传输研究工作的进展, 使 10.6 $\mu\text{m}$  激光辐照下光学元件的温度场和表面热畸变研究具有重要的意义。

作者对 10.6 $\mu\text{m}$  激光辐照下光学薄膜样品中的温度场进行了数值模拟, 应用夏克-哈特曼波前传感器<sup>[4]</sup>对几种不同的基底材料和光学元件在 10.6 $\mu\text{m}$  激光辐照下的热畸变进行了测量。

## 1 光学薄膜温度场的研究

### 1.1 光学薄膜温度场的基本理论

图 1 是高斯光束辐照下的多层膜系的示意图。多层膜的表面位于  $z = 0$  平面。从基底到样品表面, 膜层数从  $k = 1$  递增。第  $k$  层膜层的厚度为  $z_k$ ,

作者简介: 杨 富 (1971-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事激光物理与激光技术和光电检测技术研究。

E-mail: zhangbinff @sohu.com

收稿日期: 2003-06-03; 收到修改稿日期: 2003-11-07

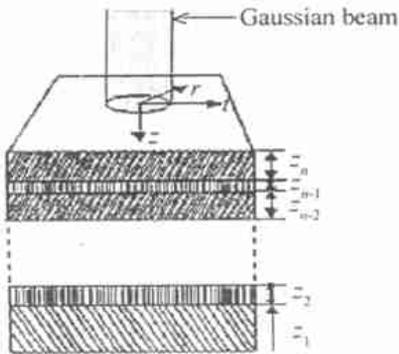


Fig. 1 Schematic of multi-layer thin film irradiated by laser

折射率为  $n_k = \text{Re}(n)^{(k)} - i\text{Im}(n)^{(k)}$ , 单位体积的热容为  $c_k$ , 热导率为  $\kappa_k$ 。入射激光束为沿正  $z$  轴方向传播的高斯光束, 光斑束腰半径为  $r_0$ , 高斯光束的波长和瞬时功率分别为  $\lambda_0, P_0(t)$ 。

由于介质吸收的存在, 每一膜层均可视为“热源”。为保证对热交换方程的顺利求解, 假定在径向和纵向的“无穷远”处温升为 0。对于从膜层表面通过热对流散失的能量, 可利用牛顿冷却定律进行描述<sup>[5,6]</sup>。通常, 通过表面热辐射所散失的能量与热传导和热对流相比较是很小的, 可不予考虑。因此, 热交换方程组可表示为<sup>[6]</sup>:

$$c_n(\partial/\partial t) T(r, z, t) - \kappa_n \nabla^2 T(r, z, t) = g(r, z, t) \quad (1)$$

$$(\partial/\partial z) T(r, z = 0, t) = \gamma T(r, z = 0, t) \quad (2)$$

式中,  $c_n$  为第  $n$  层薄膜的单位体积的热容,  $\kappa_n$  为第  $n$  层膜的热导率,  $\gamma$  为表面热交换系数,  $g(r, z, t)$  表示膜层中任一点处单位时间和单位体积内激光沉积的能量。

(1) 式表示引起微元温度变化所吸取的热量等于流入微元的热量和微元作为热源所产生的热量之和。(2) 式表明从表面散失的热量正比于薄膜表面相对于周围环境的温升。相应的边界和初始条件为:

$$T(r, z = \infty, t) = T(r = \infty, z, t) = 0 \quad (3)$$

$$T(r, z, t = 0) = 0 \quad (4)$$

### 1.2 光学薄膜温度场的数值模拟

利用“交替隐型技术”<sup>[5]</sup>对热交换方程组(1)式和(2)式进行数值求解。计算中的激光参数: 波长  $\lambda = 10.6\mu\text{m}$ , 激光模式为  $\text{TEM}_{00}$ , 激光功率  $P = 8\text{W}$ , 光斑半径为  $0.02\text{cm}$ , 工作方式为连续, 表面热交换系数  $\gamma = 0$ 。表 1 中给出了计算所用光学薄膜的热物参数。

Table 1 Optical and thermophysical parameters<sup>[7]</sup>

layer	refractive index $n$	heat capacity per volume $C/(\text{J} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{K}^{-1})$	heat conductivity $\kappa/(\text{W} \cdot \text{cm} \cdot \text{K}^{-1})$	thickness $d/\text{nm}$
substrate (Ge)	$4.01 - i5.3 \times 10^{-7}$	1.66	0.27	
$\text{SiO}_2$	$1.4 - i2.83 \times 10^{-1}$	1.899	0.062	1879
ZnSe	$2.4 - i1.76 \times 10^{-6}$	1.79	0.18	
$\text{YbF}_3$	$1.36 - i3.1 \times 10^{-3}$	3.61	0.051	

计算中所用多层光学薄膜膜系结构为: Sub/2.55H1.43L(HL)<sup>5</sup>H0.21L2.43H1.35L0.39H/Air ( $\lambda_0 = 4700\text{nm}$ ,  $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$ )。

图 2 中给出了镀制在 Ge 基底上的多层分光薄

膜样品 ( $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$ ) 在不同辐照时间下的温度场分布。图 2a 是样品表面处的径向温度场分布; 图 2b 是光斑中心处的温升随样品深度的变化; 图 2c 是  $t = 8\text{ms}$  时样品中温升的三维分布。

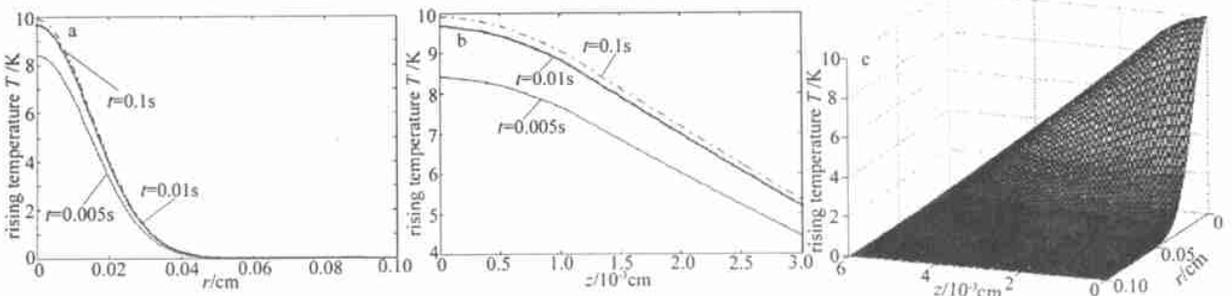


Fig. 2 Temperature rise distribution at different time

由图 2 可以看出, 温升在径向  $r$  方向上呈高斯分布, 而在纵向  $z$  方向上随着深度的增加而逐渐减小。随着激光辐照时间的延续, 薄膜中的温度在不

断上升, 且开始时温度上升得较快, 在  $t = 2\text{ms}$  后薄膜中的温度场达到稳定。

图 3 中给出了单层  $\text{SiO}_2$  薄膜在不同光斑半径

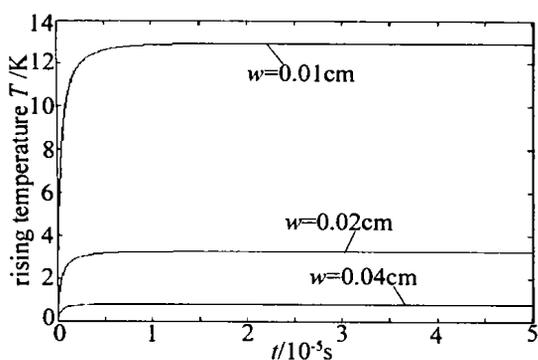


Fig. 3 Temperature rise varies with time at different  $w$

$w$  激光辐照下,距样品表面  $1\mu\text{m}$  处光斑中心的温度场温升随激光辐照时间的变化曲线。从图中可以看到,随着激光束光斑半径的减小,薄膜中的温升急剧增高。

图 4 是单层  $\text{SiO}_2$  薄膜在不同功率  $P$  的激光辐照下,距样品表面  $1\mu\text{m}$  处光斑中心的温度场温升随激光辐照时间的变化曲线。从图中可以看到,随着激光功率的增大,薄膜中的温升也在不断升高,而且温升近似与激光辐照功率成正比。

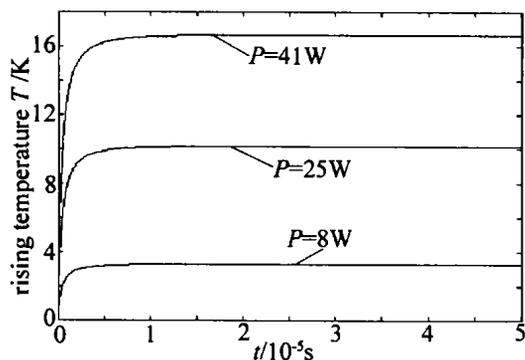


Fig. 4 Temperature rise varies with time at different  $P$

## 2 光学薄膜热畸变实验研究

### 2.1 夏克-哈特曼波前传感器的工作原理

入射波前被微透镜阵列分割成子波前阵列后,分别聚焦于阵列探测器上。当一束标准平行光入射时,将获得一组标定光斑。当带有相差的光束入射时,各个子波前在探测器靶面上的位置将随着波像差的大小而变化,通过在阵列透镜的焦面上测出畸变波前所成像斑的质心坐标与参考波前质心坐标之差,可通过波前重构算法得到畸变波前相位分布<sup>[4]</sup>。

### 2.2 $10.6\mu\text{m}$ 激光辐照下光学元件的热畸变测量

实验采用夏克-哈特曼波前传感器对基底和光学元件的热畸变进行测量。图 5 是热畸变实验装置示意图。 $\text{CO}_2$  激光以一小角照射到待测样品表面上,夏克-哈特曼波前传感器出射的  $650\text{nm}$  的平行平

面光垂直照射到待测样品表面受加热区域,经样品表面反射的畸变波前由夏克-哈特曼波前传感器接收。探测到的信号被输入到计算机中进行处理。实验中  $\text{CO}_2$  激光器在 3s 左右开始出光并加热样品,样品被持续加热直到测量结束。

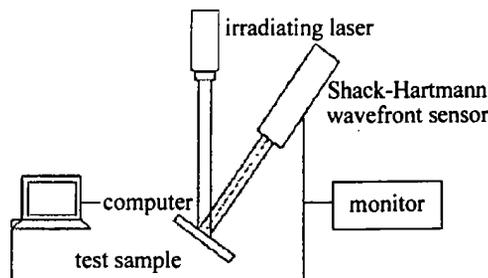


Fig. 5 Schematic of thermal distortion experimental setup

2.2.1 不同基底材料样品及多层膜样品的热畸变实验研究 由于大部分的红外光学元件均采用  $\text{Si}$ ,  $\text{ZnSe}$  或  $\text{Ge}$  材料作为基底。因此,有必要针对  $10.6\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  激光,对上述 3 种红外基底材料的热畸变进行测量。实验中用来辐照光学元件的  $\text{CO}_2$  激光器的输出功率为  $45\text{W}$ ,持续辐照样品  $10\text{s}$ ,在此过程中观察元件表面热畸变随时间的变化。

利用上述实验装置对不同基底材料的热畸变随时间的变化关系进行了研究。研究表明,对于单纯的基底材料,激光照射前后表面的形变不大。在相同功率的  $\text{CO}_2$  激光辐照下, $\text{Si}$  基底的形变量最大,而  $\text{ZnSe}$  基底的形变量最小,说明  $\text{ZnSe}$  和  $\text{Ge}$  较  $\text{Si}$  材料更适合做  $10.6\mu\text{m}$  光学元件的基底材料。然而,进一步的薄膜镀制工艺实验表明, $\text{ZnSe}$  基底上镀制的薄膜很容易脱落,因此,对于  $10.6\mu\text{m}$  激光而言, $\text{Ge}$  最适宜做基底材料。

在此基础上,对镀制在  $\text{Ge}$  基底上的 4 种不同膜系的多层分光膜样品 ( $\text{YbF}_3/\text{ZnSe}$ ) 的热畸变进行了研究,这 4 种膜系对  $10.6\mu\text{m}$  的激光都表现为高透过率。研究表明,实验中使用的这 4 种样品的形变量都比较小,但它们之间存在着微小的差别。

2.2.2 单层膜样品热畸变的研究 对  $\text{Ge}$  基底上镀制的单层  $\text{SiO}_2$  薄膜样品进行了热畸变测量,其结果如图 6 所示,图中两条曲线分别对应于  $\text{PV}$  值(上)和  $\text{RMS}$  值(下)曲线。图 6a 和图 6b 的  $\text{CO}_2$  激光器的输出功率均为  $25\text{W}$ ,但图 6b 中  $\text{Ge}$  基底上镀制的薄膜厚度较图 6a 厚,而图 6c 中实验所用激光功率为  $41\text{W}$ ,其它实验条件与图 6a 完全相同。

分析图 6 可知,从激光开始照射样品直到样品表面形变达到基本稳定所需的时间非常短。由于  $\text{SiO}_2$  单层薄膜样品产生的热畸变较大,表明  $\text{SiO}_2$  材

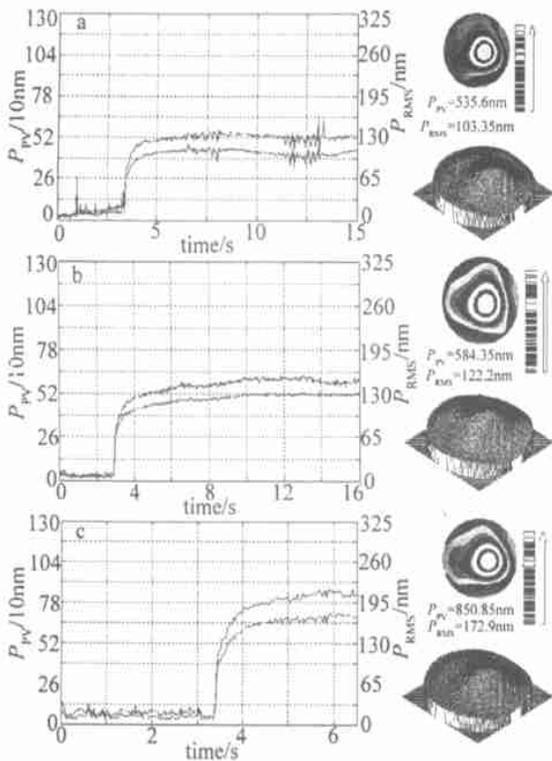


Fig. 6 Thermal distortion of single-layer thin film varies with time (left) and isothermal diagram at  $t = 8\text{s}$  (right)

料对  $10.6\mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光的吸收很高,因此,可用 Ge 基底上镀制的  $\text{SiO}_2$  单层膜作为  $10.6\mu\text{m}$  辐照下光学薄膜弱吸收测量的定标样品。

进一步比较图 6a、图 6b 和图 6c 可以看出,在相同的实验条件下,膜层厚的样品较薄的样品的表面形变要大。对同一样品,激光功率越高,样品的形变量也越大。进一步将图 6a 和图 6c 与图 4 给出的计算模拟结果进行比较可知,样品的形变随着薄膜中的温升增大而加剧,但二者并不成比例关系。

(上接第 250 页)

或自发辐射因子可提高弛豫振荡频率、缩短弛豫时间;(4)自发辐射因子增大时,边模光子密度增加、主模光子密度减小,而 VCSELs 由于微腔效应单模特性得以提高。

### 参考文献

[1] BABIC D I, STREUBEL K, MIRIN R P *et al.* Room temperature continuous-wave operation of  $1.54\mu\text{m}$  vertical cavity lasers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, 7 (11): 1225~1227.  
 [2] 邓果,潘炜,罗斌.深度调制下 VCSELs 典型结构参数的研究 [J]. *光电子·激光*, 2003, 14 (6): 562~565.

### 3 小结

给出了多层光学薄膜的温度场模型,采用交替隐型技术对光学薄膜的温度场进行了计算模拟和分析。在此基础上,采用夏克-哈特曼波前传感器对不同基底材料、不同厚度单层光学薄膜以及不同膜系的多层光学薄膜样品在  $10.6\mu\text{m}$  激光辐照下的热畸变进行了实验研究。研究表明,激光辐照下光学薄膜样品的温度场分布与辐照激光的光场分布、激光功率以及激光的辐照时间等因素有关。对于  $10.6\mu\text{m}$  激光而言,Ge 最适宜做基底材料。Ge 基底上镀制的  $\text{SiO}_2$  单层膜可作为  $10.6\mu\text{m}$  辐照下光学薄膜弱吸收测量的定标样品。在相同的实验条件下,膜层厚的样品较薄的样品的热畸变要大。泵浦激光功率越高,样品的热畸变也越大。样品的形变随着薄膜中的温升增大而加剧,但二者并不成比例关系。

### 参考文献

[1] ABRAHAM E, HALLEY J M. Some calculation of temperature profiles in thin films with laser heating [J]. *Appl Phys*, 1987, A42: 279~285.  
 [2] LAX M. Temperature rise induced by a laser beam [J]. *J A P*, 1977, 48 (9): 3919~3924.  
 [3] 徐阳,王新兵.高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器 [M]. 北京:国防工业出版社,2000. 3~6.  
 [4] 姜文汉.哈特曼波前传感器的应用 [J]. *量子电子学报*, 1998, 15 (2): 228~235.  
 [5] MANSURIPUR M, CONNELL G A N, GOODMAN J W. Laser-induced local heating of multilayers [J]. *Appl Opt*, 1982, 21 (6): 1106~1114.  
 [6] 胡海洋.光学薄膜强激光热力耦合损伤研究 [D]. 上海:中国科学院上海精密机械研究所,2001. 25~28.  
 [7] KLOCEK P. *Handbook of infrared optical materials* [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1991. 155~191.

[3] AGRAWAL G P, DUTTA N K. *Semiconductor lasers* [M]. New York: van Nostran Reinhold, 1993. 231~311.  
 [4] 潘炜,张晓霞,罗斌.垂直腔激光器中弛豫振荡频率的优化控制 [J]. *激光与红外*, 2002, 32 (1): 27~29.  
 [5] NABL M L. Relaxation oscillations and stability [J]. *IEEE J Q E*, 1982, 18 (12): 1992~1994.  
 [6] 张晓霞,潘炜,罗斌 *et al.* 半导体微腔激光器瞬态响应及调制特性分析 [J]. *激光技术*, 2001, 25 (3): 221~224.  
 [7] CHOA F S, LEE Y H, KOCH T L *et al.* High-speed modulation of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1991, 3 (8): 697~699.  
 [8] 郭长志,陈水莲.分布反射面发射垂直微腔半导体激光器的微腔效应 [J]. *物理学报*, 1997, 46 (9): 1731~1743.