

61-66

第4卷第5期  
1996年10月光学 精密工程  
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5  
October, 1996连续波强激光辐照下光学薄膜元件  
损伤机理和热畸变研究

黄 伟 张云洞

(中国科学院光电技术研究所, 双流 610209)

0484.4

**摘要** 研究了多层反射膜的光学吸收, 得到薄膜界面吸收系数的近似计算式。对环状强激光辐照下光学薄膜元件的瞬态温度场和热畸变分布以及损伤机理进行了详细的理论分析, 用泰曼干涉仪实际测量了连续波氧碘激光辐照光学元件的热畸变量, 并与理论计算结果相比较, 理论和实验符合较好。

**关键词:** 光学薄膜; 瞬态温度; 热畸变; 损伤机理

## 1 引 言

在高功率激光系统中, 光学薄膜作为光学元件的组成部分, 通常是重要而又薄弱的环节, 在激光系统中, 从激光束的产生、光束变换、扩束、定向、跟踪、瞄准等都离不开光学薄膜, 所以其性能的好坏对激光系统的影响是非常大的。同时, 由于光学薄膜的激光损伤阈值往往要低于光学元件裸表面 2-4 倍, 因而在激光器中薄膜被破坏的问题限制了激光器功率的进一步提高。因此, 光学薄膜的抗激光强度是激光系统设计的重要依据和最大限制, 改进薄膜性能, 提高其破坏阈值就有更重要的实际意义。

本文研究了多层反射膜的光学吸收和在环状强激光辐照下的光学薄膜元件的瞬态温度场和热畸变分布, 并对薄膜的损伤机理进行了探讨, 通过实验验证了理论分析是可靠的。

## 2 多层反射膜的光学吸收

镀膜材料和镀膜工艺使多层膜存在吸收和散射。吸收和散射可以发生在膜体内, 也可发生在膜与膜界面和膜与基片界面上。实验表明, 吸收主要发生在膜与膜界面和膜与基片之间的界面上<sup>[1]</sup>。对标准四分之一波长膜堆, 各膜层之间的界面吸收系数为<sup>[1-3]</sup>:

$$A_i = \left\{ 1 - R - \frac{4V}{\varphi} \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} - 32\pi^2 n_0 n_H \left( \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \left( \frac{\sigma}{\lambda_0} \right)^2 \right\} \times \left\{ 4 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2N+1} \right] \left( \frac{1}{n_H^2 - n_L^2} \right) \right\}^{-1.0} \quad (1)$$

收稿日期: 1996年8月5日

式中  $\sigma$  为均方根表面粗糙度 ( $\text{\AA}$ ),  $R$  为薄膜反射率,  $\lambda_0$  为激光波长 ( $\text{\AA}$ ),  $N$  为膜堆数,  $n_H$  为高折射率膜层折射率,  $n_L$  为低折射率膜层折射率。对于介质基板  $\Psi = n_s, \varphi = n_{iI}^2$ 。对于金属基片和准介质基片,  $n_s$  为金属基片折射率,  $k_s$  金属基片的消光系数。

$$\varphi = \frac{n_s}{\left\{ \frac{1 + \cos \delta}{2} \left( \left[ \frac{n_r}{n_{iI}} \right]^2 + \left[ \frac{k_r}{n_{iI}} \right]^2 \right) + \frac{1 - \cos \delta}{2} - \frac{k_r}{n_{iI}} \sin \delta \right\}}$$

$$\tan \delta = \frac{2n_{iI}k_s}{n_{iI}^2 - n_s^2 - k_s^2}, \psi = n_{iI}^2$$

### 3 环状光束辐照下的瞬态温度场

膜对在环状光束辐照下,在半径方向上大于外环半径  $R_{\beta 2}$  小于平板光学元件外半径  $R_c$  区域内的温度分布为<sup>[4]</sup>:

$$\Delta T_{\text{ReI}} = \Delta T_{\text{coating}} \sqrt{\frac{R_{\beta 2}}{R_{c1}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{c1} - R_{\beta 2}}{2\sqrt{a_c\tau}}\right) + \frac{\Delta T_{\text{coating}}(R_{c1} - R_{\beta 2})\sqrt{a_c\tau}}{4R_{\beta 2}^{0.5}R_{c1}^{1.5}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{R_{c1} - R_{\beta 2}}{2\sqrt{a_c\tau}}\right) +$$

$$\Delta T_{\text{coating}} \frac{(9R_{\beta 2}^2 - 2R_{\beta 2}R_{c1} - 7R_{c1}^2)(a_c\tau)}{32R_{\beta 2}^{1.5}R_{c1}^{2.5}} i^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{c1} - R_{\beta 2}}{2\sqrt{a_c\tau}}\right) +$$

$$\left\{ \Delta T_{\text{substrate}} \sqrt{\frac{R_{\beta 2}}{R_{c1}}} \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{c1} - R_{\beta 2}}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \frac{\Delta T_{\text{substrate}}(R_{c1} - R_{\beta 2})\sqrt{a\tau}}{4R_{\beta 2}^{0.5}R_{c1}^{1.5}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{R_{c1} - R_{\beta 2}}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \right.$$

$$\left. \Delta T_{\text{substrate}} \frac{(9R_{\beta 2}^2 - 2R_{\beta 2}R_{c1} - 7R_{c1}^2)(a\tau)}{32R_{\beta 2}^{1.5}R_{c1}^{2.5}} i^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{c1} - R_{\beta 2}}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right\} \times$$

$$\{1 - e^{H_{1N}^2\tau} \operatorname{erfc}(H_{1N}\sqrt{a_c\tau})\} \quad (2)$$

式中  $\Delta T_{\text{coating}}$ 、 $\Delta T_{\text{substrate}}$  为激光束辐照区域内膜对、基片的温升;  $R_{\beta 1}$  为圆环光束内环半径;  $R_{\beta 2}$  为圆环光束外环半径;  $R_{c1}$  为计算点的半径;  $a_c$  为膜对的平均热扩散系数;  $a$  为基板的热扩散系数;  $\tau$  为激光运行时间;  $H_{1N}$  为薄膜瞬态热传播系数;  $H_{2N}$  为基板瞬态热传播系数;  $\operatorname{erfc}(x)$  不补余误差函数;  $i^0 \operatorname{erfc}(x) = \operatorname{erfc}(x)$ ;  $i^n \operatorname{erfc}(x) = \int_0^\infty i^{n-1} \operatorname{erfc}(\xi) d\xi$ 。

小于内半径或者等于零(圆盘中心处)的温度分布为:

$$\Delta T_{R_{\beta 2}} = \Delta T_{\text{coating}} \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{\beta 1} - R_{\beta 2}}{2\sqrt{a_c\tau}}\right) + \left\{ \Delta T_{\text{substrate}} \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{\beta 1} - R_{\beta 2}}{2\sqrt{a\tau}}\right) \left[ 1 - e^{(H_{1N}^2\tau)} \operatorname{erfc}(H_{1N}\sqrt{a_c\tau}) \right] \right\} \quad (3)$$

对于基片的温度分布也可以作同样的分析。

### 4 光学元件的热畸变

强激光反射镜在连续波高功率强激光辐照下温度将会升高,由于是部分受热,不仅整个镜

面的温度分布是不均匀的,而且轴上温度分布也是不均匀的,因此反射镜将产生热变形。在强激光系统中,镜面热变形是非常有害的,它不仅使激光光束质量变差,而且对强激光的传输也产生不利影响。

如果圆形光学元件由相隔 $120^\circ$ 三点支撑,则热畸变<sup>[5]</sup>:

$$\Delta_0 = \frac{0.0362\pi Q_0 R^4}{D} \quad (4)$$

式中  $Q_0 = 8D(1 + \mu_0)/(R_1 R_2^2)$ , 为光学元件轴上温度梯度产生的压强(N/m<sup>2</sup>);  $R$  为元件半径(cm);  $D = Et_0^3/[12(1 - \mu_0^2)]$  为基片材料的刚性模量系数(N·m);  $\mu_0$  为泊松比;  $E$  为杨氏模量(N/m<sup>2</sup>);  $R_1 = t_0/[\alpha(\Delta T_1^{[F]} - \Delta T_1^{[B]})]$  为光学元件变形弯曲的球面半径;  $t_0$  为平板元件的厚度;  $\alpha$  为基片热膨胀系数;  $\Delta T_1^{[F]}$ ,  $\Delta T_1^{[B]}$  为基片前后表面的温度。

## 5 薄膜激光损伤机理

薄膜激光诱导损伤与三个过程相联系:薄膜吸收激光束辐射的能量,吸收的能量由一些局部吸收点进行输运,由于薄膜材料热力学因素使某些局部热量集中,当这些局部区域超出某一临界温度,便出现薄膜损伤。薄膜损伤主要表现为两个方面,一是薄膜的损伤,它表现为烧蚀或脱落;二是由于基底导热性能不好,则表现为薄膜尚未毁坏,而基底却炸裂。薄膜损伤有以下几种方式:

### 1 熔融损伤

熔融破坏是薄膜最基本的破坏机理,当薄膜温度达到其熔化温度时就造成熔融破坏。薄膜材料的熔化点温度称为其破坏的临界温度。

### 2 热应力破坏

在激光辐照下,薄膜温度升高引起的热应力为:

$$\sigma = \alpha E \Delta T (1 - 2\mu) \quad (5)$$

式中  $\sigma$  为热诱导应力(N/cm<sup>2</sup>),  $\mu$  为泊松比,  $\alpha$  为线性膨胀系数(°C<sup>-1</sup>)。

假如薄膜温度升高到这一点,在这个温度下表面吸附力被克服,膜层开始脱落,产生灾难性损伤。Kreidl 和 Rood 建议热诱导应力不超过 2000 #/in<sup>2</sup> (1379 N/cm<sup>2</sup>)。

### 3 热冲击破坏

对于光学基片,它的热冲击为<sup>[6]</sup>:

$$\Delta T_{\text{shock}} = \frac{\epsilon E (1 - \mu)}{E \alpha} \quad \frac{h_c t_0}{K} \geq 6.25 \quad (6)$$

$$\Delta T_{\text{shock}} = \frac{\epsilon E (1 - \mu)}{E \alpha} \cdot \frac{6.25 K}{h_c t_0} \quad \frac{h_c t_0}{K} < 6.25 \quad (7)$$

式中  $\epsilon$  为基片应变率,包含准弹性模量;  $\alpha$  为基片线性膨胀系数(°C<sup>-1</sup>);  $E$  为基片的杨氏模量(N/cm<sup>2</sup>);  $E_c$  为基片的断裂模量(N/cm<sup>2</sup>);  $t_0$  为基片厚度(cm);  $h_c = \frac{K}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \tau}} \geq \frac{K}{t_0}$  (W/cm<sup>2</sup>·°C);  $K$  为基片的热导率(W/cm·°C)。

假如在第一膜对和基片表面两者之间有太大的温度差异,双轴应变将引起薄膜脱落和裂纹,形成薄膜的热冲击损伤。薄膜能够承受的热冲击温度为:

$$\Delta T_{\text{shock}} = \frac{\epsilon_c E_c (1 - \mu)}{E_c (\alpha_1 - \alpha_2)} \quad (8)$$

式中  $\epsilon_c$  为薄膜材料的应变率;  $\alpha_c$  为薄膜材料线性膨胀系数 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\alpha_s$  为基片线性膨胀系数 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $E_c$  为薄膜的杨氏模量 ( $\text{N}/\text{cm}^2$ );  $E_c \epsilon_c$  为薄膜的断裂模量 ( $\text{N}/\text{cm}^2$ ).

#### 4 缺陷损伤

缺陷吸收不同于材料的本征吸收(通常是大于本征吸收)<sup>[7]</sup>, 于是在激光作用下, 一种是杂质的温度不断累积, 直至达到其熔点, 造成熔融破坏; 另一种是杂质在激光作用下, 瞬间的高温分布使得薄膜产生微小的破坏. 这些破坏中, 有些是可逆的, 即的激光停止作用时, 它能复原; 有些则不能, 这种破坏是不可逆、灾难性的. 不能复原的杂质点在连续激光的作用下, 微小的破坏不断累积, 直至造成最后摧毁性破坏, 如应力破坏、雪崩离化等.

表1 各种膜系在不同损伤机制时的损伤临界温度

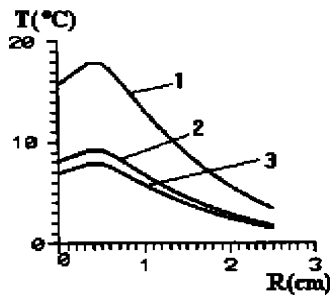
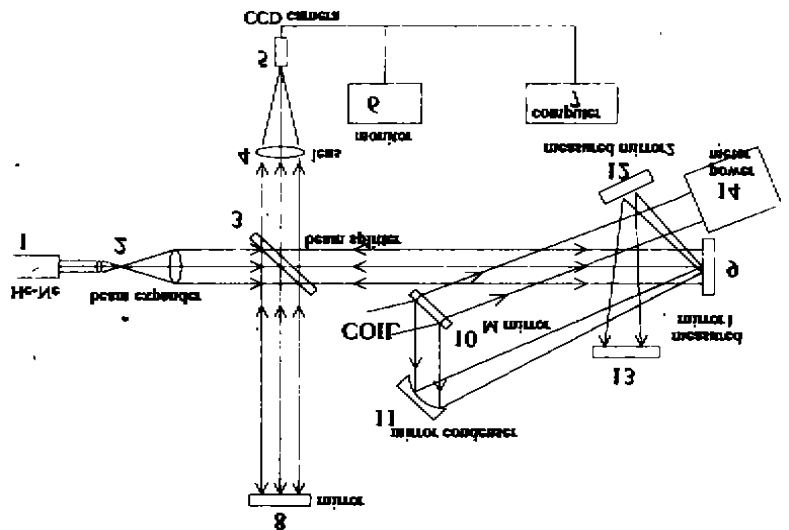
膜对	熔化损伤	热应力损伤	热冲击损伤 $^{\circ}\text{C}$		
	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	Si	$\text{SiO}_2$	K9
$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$	1696	1.33	620	1039	127
$\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$	1696	0.98	488	1905	121
$\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2$	1696	0.83	477	2963	118

## 6 理论计算和实验结果

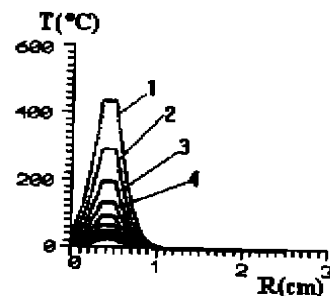
热变形和激光损伤实验用泰曼干涉仪进行测量<sup>[8]</sup>. 当连续氧碘激光束经球面反射镜聚焦在泰曼干涉仪的一个镜面时, 由于膜层吸收光能生成热量引起镜面温度分布不均匀, 使镜面发生热变形, 使之和参考镜面之间的光程差发生改变, 从而使干涉条纹发生移动, 实验中通过测量激光照射区域内某一点的干涉条纹的变化量得到这点的热畸变量, 即

$$\Delta = N \times (\lambda/2) \quad (9)$$

其中  $N$  为变化的条纹数,  $\lambda$  是测试用激光波长, 这里为 He-Ne 激光,  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ .



(a) 基片的温度分布



(b) 膜对的温度分布

图2 542号激光反射镜的基片温度分布和膜层温度分布理论计算曲线

图2为542号激光反射镜的基片温度分布和膜对温度分布理论计算曲线。

图(a)数字1,2,3分别表示基片前表面、中心和后表面的温度分布。图(b)数字1,2,3,4等表示膜对数,数字1表示的是最外层。

表2 热畸变实验参数

实验 编号	镜 片		激光参数				
	基片	膜对	外环直 径(mm)	内环直 径(mm)	面积 (mm <sup>2</sup> )	平均功率 (kW)	平均功率密度 (kW/cm <sup>2</sup> )
542	Si	(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sup>11</sup>	10	7.0	40	21.26	53.1
543	Si	(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sup>11</sup>	17	11.9	116	18.44	15.9
544	Si	(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sup>11</sup>	14	9.8	79	18.24	23.2
549	Si	(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sup>11</sup>	20	14.6	160	23.21	14.5
553	Si	(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sup>11</sup>	14	9.8	79	29.24	37.3
554	Si	(ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sup>12</sup>	10	7.0	40	30.19	75.4
565	K9	(ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sup>12</sup>	10	7.0	40	15.63	39.0
570	SiO <sub>2</sub>	(ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> ) <sup>12</sup>	10	7.0	40	27.45	68.6

图3是542号反射镜的热畸变随时间变化的理论曲线和实验结果比较。

计算中硅基片的泊松比  $\mu_0 = 0.26$ , 热膨胀系数  $\alpha_{si} = 2.62 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 。图中曲线为理论计算结果,符号×表示实验测量结果,从图中可以看出二者符合较好,同时可知热畸变量随激光运行时间的增长而增加。

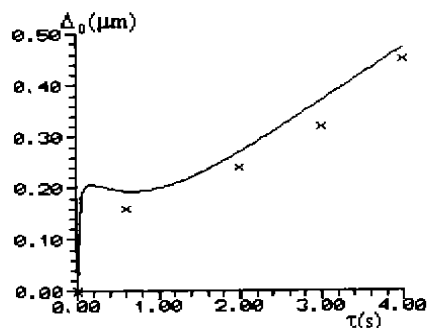


图3 542号反射镜的热畸变随时间变化的理论曲线和实验结果比较

表3 实验结果和理论值比较表(单位 μm)

实验编号	542	543	544	549	553	554	565	570
实验结果	0.443	0.157	0.157	0.45	—	0.45	—	—
理论结果	0.474	0.175	0.184	0.484	1.41	0.436	24.6	15.1

## 6 结论和讨论

通过对环状光束辐照光学薄膜元件的温度分布和热畸变的理论分析和在实验条件下的测试结果相比较,可以说时理论和实验相吻合。由理论和实验结果可知,相同膜系不同基片材料的激光反射镜热畸变量不同,这与基片材料的热力学特性有关。热传导系数、热扩散系数大的,热膨胀系数小的基片材料其热畸变量就小,理论计算和实验结果均表明 Si 基板的热畸变最小,K9基板最大,熔石英介于两者之间;全介质膜系比金属增强型膜系小,其原因主要在于金属增强型薄膜的吸收比全介质薄膜要高出一个数量级,这也说明了薄膜内的吸收是导致它们

损伤的主要因素。我们还对连续波强激光对光学薄膜元件的损伤机理进行了研究,研究表明损伤的主要原因有熔融破坏、热应力破坏、热冲击应力破坏以及缺陷吸收引起其它破坏等,其中最有可能的损伤原因是由于缺陷吸收引起的热应力破坏,使元件发生龟裂、脱层。另外还对光学薄膜元件损伤的临界温度进行了讨论,得到各种膜系损伤的临界温度。

#### 参 考 文 献

- [1] P. A. Temple, *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34**:677
- [2] H. E. Bennett, and D. K. Burge, *J. O. S. A.*, 1980, **70**:268
- [3] 唐晋发,郑 权, *应用薄膜光学*,上海科学技术出版社,1984:189
- [4] J. R. Palmer, *Proc. SPIE*. 1993, 397-427
- [5] S. Timoshenko, et al., *Theory of Plates and Shells*. McGraw Hill Book Co. New York, 1959
- [6] B. E. 盖脱伍德, *热应力*. 科学出版社, 1964:157
- [7] N. Bloembergen, *Appl. Opt.*, 1973, **12**:661
- [8] R. Wood, *Laser Damage in Optical Materials*. Adam Hilger, Bristol, 1986

### Study of the Damage Mechanism and Thermal Distortion of Optical Coating Components under CW High Power Laser Radiation

Huang Wei, Zhang Yundong

(*Institute of Optics & Electronics, Academy Sinica, Shuangliu 610209*)

#### Abstract

In this paper, the optical absorption in reflectance multilayer coatings has been studied. The simulating expressions of interface absorption coefficients of coatings are obtained. The transient temperature distribution, optical distortion and damage mechanism resulting in an annular high power continuous wave (CW) laser radiation have been studied in detail. Thermal distortion of optical components under CW Oxygen Iodine Laser (COIL) radiation has been measured by Twyman-Green interferometer. The results of the comparison of the experimental results to the theoretical results show that experimental results are consistent with theoretical results.

**Key words:** Optical coating, Transient temperature, Thermal distortion, Damage mechanism

黄 伟 男, 1967年4月生, 1990年四川大学物理系原子核物理与技术专业本科毕业, 1996年中国科学院光电技术研究所光学仪器专业硕士研究生毕业, 主要从事光学薄膜技术及理论研究。