

利用电介质保护膜提高铝镜和硅窗口的 抗激光强度

赵强 范正修 周东平 范瑞瑛 刘立明

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 从加快热传导及其减小光能吸收两个方面入手, 讨论了通过增镀介质膜提高铝镜和硅窗口的激光对抗能力的具体措施及其可行性。在 $1.06 \mu\text{m}$ 红外激光与铜蒸气激光损伤实验中, 经过加固的样品的损伤阈值均有所提高, 从而验证了加固措施的合理性。

关键词 热传导, 光吸收, 损伤阈值

1 引言

围绕激光损伤的机理, 学者们提出了众多的理论和假设^[1], 众说纷纭。然而概括起来, 破坏的机理不外乎两种: 热破坏及其场破坏^[2]。一般而言, 在长脉冲激光破坏中, 主要表现为材料对入射激光能量的本征吸收、晶格振动吸收及外因吸收引起的热破坏; 在短脉冲情况下, 初期主要表现为场破坏。场破坏引起材料的非线性吸收大大增加, 进而场破坏与热破坏相互作用, 大大加速破坏的进程。所以我们认为, 在激光损伤中, 热破坏是主要的表现形式。在引起热破坏的三种吸收中, 外因吸收的来源比较复杂, 包括杂质、缺陷或吸附水分等。为简化分析计算, 本文暂不考虑外因吸收。本文将从热破坏的角度分析抗激光加固理论。

2 加固理论

在热破坏中, 如何降低局部热量是我们所关注的。可设想减小光能吸收, 或是加快热传导以使局部不致有过高的温升。为此, 我们对薄膜温度场进行计算, 以验证以上两种途径的理论可行性。

对于激光辐射下的平板膜系, 应用以下的热传导方程^[3]

$$\rho_n C_n \frac{\partial T}{\partial t} - K_n \nabla^2 T(r, z, t) = g(r, z, t) \quad (1)$$

式中, ρ_n 、 C_n 、 K_n 分别为第 n 层膜的密度、定压比热和热导率; $g(r, z, t)$ 为膜层单位时间、单位体积内吸收的入射激光能量; z 沿膜面法线方向, r 平行于膜面。

我们定义 T 为 (r, z) 点 t 时刻相对于环境的温升。

边界条件及初始条件为

$$\frac{\partial T(r, z=0, t)}{\partial t} = \gamma T(r, z=0, t) \quad (2)$$

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

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

式中 γ 为表面热流系数。

由式(1),(2),(3),(4)采用交替隐形式算法,可计算出膜层内的二维温度场分布。

计算中,假定材料的热物性参数不随温度变化,并忽略界面热阻的影响;考虑到表面热辐射与热对流的存在,我们取 $\gamma = 10^5 \text{ cm}^{-1}$ [3];以下 2.1 节及 2.2 节计算中所用的入射激光为 $1.06 \mu\text{m}$ 红外激光,其脉宽为 50 ps ,聚焦光斑直径取为 $5 \mu\text{m}$ ($1/e^2$ 光强处,实际的损伤实验中聚焦斑直径一般均大于或接近 $100 \mu\text{m}$,此处取值仅作为计算参考),其峰值功率取为 500 W 。

2.1 减小光能吸收

膜系的光能吸收率

$$A = 1 - R - T - S \quad (5)$$

式中 S 为散射,此处可忽略。

2.1.1 对铝镜的保护

对于金属反射镜而言, $T = 0$ 。可见,增大膜系的反射率 R ,即可降低其吸收。

假定可以忽略透明介质膜的弱吸收。可以在金属膜上镀上一对或几对高、低折射率交替的介质膜,以增加其反射率,从而减少光吸收,同时也保护金属膜免受大气的侵蚀[4]。假定介质膜的光学厚度皆为入射光波长的 $1/4$,且低折射率膜紧贴金属膜,则膜系的反射率为

$$R = \frac{[n - (n_L/n_H)^{2m}]^2 + K^2}{[n + (n_L/n_H)^{2m}]^2 + K^2} \quad (6)$$

式中 n_H, n_L 分别为高、低折射率膜层的折射率, m 为介质膜的层对数, $(n - ik)$ 为金属膜的复折射率。可见,随着保护膜层的层对数 m 增加, R 趋近 1,金属膜的吸收可以降低得很低。

我们于理论上构造三个样品膜系 a, b, c (其膜系参数及光能吸收率见表 1),并分别计算出其铝膜前表面在第一个激光脉冲下的温度响应,得到温度曲线 A, B, C ,见图 1。

Table 1 Optical absorption of Al mirrors

Sample	Multilayer structure	Optical absorption	Note
<i>a</i>	$n_0 \text{ AG}$	9.15%	n_0 : air; G: K9 glass; A: aluminum film (130 nm); H: ZrO_2 ; L: SiO_2 ; λ_0 : $1.06 \mu\text{m}$
<i>b</i>	$n_0 \text{ HAG}$	4.48%	
<i>c</i>	$n_0 \text{ 3(HL)AG}$	1.44%	

由图 1 可见,无保护膜的铝膜在第一个激光脉冲下最高温升可达五百余度(铝的熔点约为 $660 \text{ }^\circ\text{C}$)。对高功率激光,极有可能在第一个脉冲下即产生热烧熔破坏;对稍低功率的激光,则是在脉冲关闭降温后的残余温升的基础上由多脉冲所致的积累温度破坏;引入保护膜层后有效地降低了铝膜表面的温升。如果定义损伤温度为熔点,则在此定义的基础上,可以认为保护膜的引入将极大地提高其 1-on-1 损伤阈值。同时由于降低了第一个脉冲下的温升,使达到破坏温度的时间增加,从而可提高其 n -on-1 阈值,或者说使达到破坏所需的脉冲数 n 增加。

2.1.2 对硅窗口的保护

窗口材料硅在可见光和近红外波段的消光系数大约为 10^{-2} 量级, 当厚度为几十微米时, 计算得到硅的吸收率大于 50%, 如此高的吸收大大地限制了其抗激光强度。

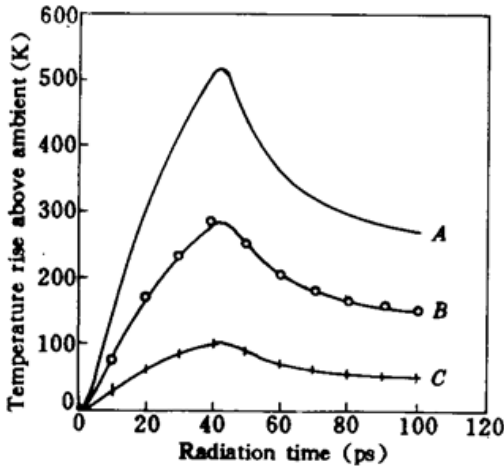


Fig. 1 Calculated temperature rise of the front surface of aluminum films coated on mirrors *A*, *B* and *C* upon the irradiation of a laser pulse

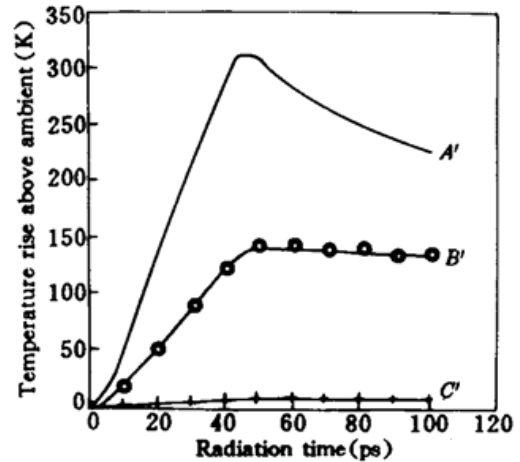


Fig. 2 Calculated temperature rise of the front surface of Si layer coated on Si windows upon the irradiation of a laser pulse

与 2.1.1 节同理, 在硅片上加镀若干层高、低折射率交替的介质膜可有效地降低其总的光学吸收。表 2 中列出三个样品膜系 a' , b' , c' 的结构参数, 并以分光光度计测得其光学吸收。比较而言, 引入保护膜后, 光能吸收大幅度地降低了。我们分别计算出三种膜系中硅片前表面在第一个激光脉冲下的温度响应曲线 A' , B' , C' , 见图 2。从中看来, 对应于光能吸收的减小, 其温升也同样得到了极大的降低, 保护效果是明显的。

Table 2 Optical absorption of Si windows

Sample	Multilayer structure	Optical absorption	Note
a'	n_0 BG	54.52%	n_0 : air; G: K9 glass; B: Si layer (47 μm); H: ZrO_2 ; L: SiO_2 ; λ_0 : 1.06 μm
b'	n_0 H4(LH)BG	19.44%	
c'	n_0 H9(LH)BG	1.24%	

归纳以上分析, 可见介质保护膜的引入降低了铝膜面及硅窗口表面的温升, 提高了其抗激光强度; 而且原则上随着保护膜层对数 m 增加, 体系光能吸收将降得很低, 从而可极大地降低温升, 大幅度地增强其抗激光强度。但从损伤热过程发展及近来研究表明, 薄膜损伤并非仅当温度接近熔点而出现, 而是更倾向于不同材料间热物性差异所致的热力耦合破坏, 这个温度远低于材料熔点温度。我们认为, 当保护膜层数足够多时, 光能吸收已降得很低, 此时体系的抗激光强度将转而由介质膜与金属膜之间的热力耦合所能承受的激光能量决定, 阈值增强效应受到抑制。在第三部分的实验结果中, 我们可以观察到这个现象。

2.2 加快热传导

为使膜层内局部不致有过高的温升, 在基本不影响膜系的光学性能的基础上, 我们可考虑增镀大传导透明介质膜以加快局部的热传导。

以表 1 所示的铝膜为例, 我们在铝膜上镀一层光学厚度为 $\lambda_0/2$ 的透明介质膜, 并试着改变其热导率, 从而计算出在不同热导率的保护膜下的铝膜前表面的温升曲线, 见图 3。由图可见,

随着保护膜热导率增加,铝膜面的温度响应降低。

在透明介质膜中,金刚石膜是最理想的热导膜,其导热系数甚至高于铝,我们观察在铝膜上镀金刚石膜的效果。为排除引入金刚石膜而降低膜系光能吸收的可能性,我们取其光学膜厚为 $\lambda_0/2 = 530 \text{ nm}$,这样金刚石膜在光学上形同虚设。我们计算出铝膜前表面的温度响应,见图 4 中曲线 *D*。与图 1 中曲线 *A* 比较可见,大传导膜的引入同样降低了铝膜面的温度响应。

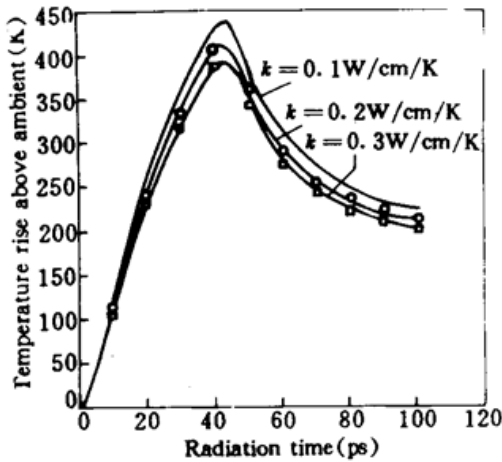


Fig. 3 The temperature rise of the front surface of aluminum films coated on aluminum mirrors protected by single dielectric layers with different heat conductivities

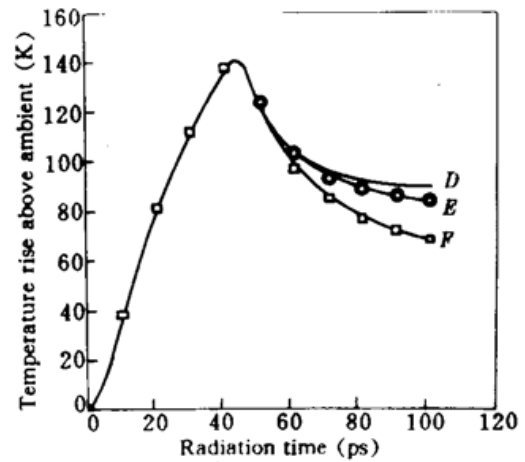


Fig. 4 The temperature rise of the front surface of aluminum films coated on three kinds of aluminum mirrors protected by diamond films

考虑到一般损伤实验中,破坏首先出现于膜系与基板界面。我们在铝膜与基板之间再加镀一层 $\lambda_0/2$ 厚的金刚石膜,得到曲线 *E*,见图 4。由图可见,在脉冲关闭后的热扩散阶段,曲线 *E* 的降低比曲线 *D* 更快。故而对于高重复频率,存在温度累积的激光破坏,上下两层金刚石膜的保护效果稍好。

从热学模型来看:在光能吸收相同的情况下,铝膜前表面的温升随保护膜厚的增加而降低,因为这对应于热扩散的长度增加。我们在表 1 所示的样品 *a* 的铝膜面上镀一层光学厚度为 λ_0 的金刚石膜,并计算出其温度曲线 *F*,见图 4。显然,与曲线 *D* 相比,脉冲关闭后的迅速降温可有效地抑制温度累积。

至此,可以认为铝膜面的温升与保护膜厚之间的关系是光学因素与热学因素综合作用的结果。在实际设计时,应考虑两方面的影响。

3 实 验

为了验证我们的加固理论,我们制备了两套样品膜系,并分别在 Nd:YAG 激光器(波长 $1.06 \mu\text{m}$,脉宽 50 ps ,脉冲重复频率为 75 MHz ,峰值功率为 5.8 kW)和铜蒸气激光器(波长 510.6 nm 及 578.2 nm ,脉宽 30 ns ,脉冲重复频率 6 kHz ,峰值功率 $2 \times 10^6 \text{ W}$)上进行了 *n*-on-1 破坏实验。实验装置如图 5 及图 6。膜系结构参数及其损伤阈值见表 3。前者用光热偏转技术实时观测其损伤过程;后者考虑到铜蒸气激光器的强大干扰信号,不宜使用光热偏转法,我们以显微镜观察膜面损伤状况。损伤功率值以功率计测定。

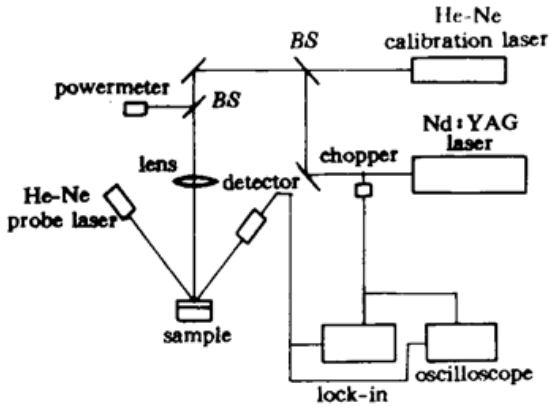


Fig. 5 Experimental layout for 1.06 μm laser damage measurement

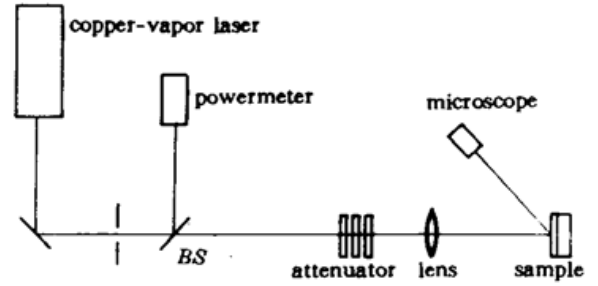


Fig. 6 Experimental layout for copper-vapor laser damage measurement

Table 3 Multilayer structure and damage threshold of Al mirror and Si windows

Sample		Multilayer structure	Damage threshold ($\times 10^3 \text{ W/cm}^2$)	Spot area ($\times 10^{-2} \text{ mm}^2$)	Note
Nd : YAG laser damage test	1	n_0 AG	3.39	7.07	n_0 : air; G: K9 glass; H: ZrO_2 ; L: SiO_2 ; A: aluminum film (130 nm); B: Si layer (47 μm); λ_0 : 1.06 μm
	2	n_0 1.03(HL)AG	3.54	7.07	
	3	n_0 BG	7.07	7.07	
	4	n_0 H4(LH)BG	14.14	7.07	
	5	n_0 H9(LH)BG	12.30	6.50	
Copper-vapor laser damage test	6	n_0 AG	0.80	25.50	
	7	n_0 2(HL)AG	0.91	25.50	
	8	n_0 BG	0.60	25.50	
	9	n_0 H5(LH)BG	0.91	25.50	
	10	n_0 H11(LH)BG	1.04	25.50	

从表 3 中数据并结合实验现象,我们可得出如下结论:

(1) 比较样品 1, 2 与 6, 7, 发现对 1.06 μm 激光和铜蒸气激光破坏,保护膜的引入均适当地提高了铝镜的损伤阈值。两种情况下分别提高 2.54% 和 13.75%, 增强效应不是很明显。我们认为:一则,由于所镀介质膜层数较少,铝镜的光能吸收降低不多;二则,对于无保护膜的铝镜,其损伤温度对应于产生较大热形变或甚而热烧融的温度。而引入介质膜层后,由于铝金属与介质材料之间的热物性参数相差巨大,一定程度的温升即可引起热力耦合破坏,即附加热应力撕裂介质膜层,这个温度比铝的熔点低很多。故而铝镜的阈值增强不明显。鉴此,在设计保护膜系时,可综合考虑减小光学吸收及加快热传导。例如,可考虑选择大传导膜,如金刚石膜,作为膜对材料。

(2) 从样品 3, 4, 5 及 8, 9, 10 的数据看,加以保护的硅片对 1.06 μm 激光及铜蒸气激光都有明显的阈值增强,最大可提高近两倍。我们认为,这一方面是由于膜系的光能吸收得到了大幅度的降低;另一方面,硅与介质膜的热物性参数较接近,热力耦合破坏的影响降低。实验结果向我们证明,对薄膜进行光热综合设计以降低膜层内的局部温升是提高薄膜损伤阈值的极为有效的手段。

(3) 比较样品 4 与 5 及 9 与 10 的数据,可见当介质膜层数足够多时,阈值改善已不明显。我们认为原因在于此时光学吸收已足够小,继续增加膜层所减小的光学吸收对薄膜温度场的影响已很微弱,体系对激光的抵抗转而由介质膜承担。在 Nd:YAG 激光损伤中,我们以光热偏转法实时观察样品的破坏情况,发现损伤首先出现于表面介质膜,这与以上的分析是相符的。

参 考 文 献

- 1 T. W. Walker, A. H. Guenther, P. E. Nielsen. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings. *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17(10): 2041~2065
- 2 顾培夫 编著. 薄膜技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1990. 217~222
- 3 M. Mansuripur, G. A. N. Connell, J. W. Goodman. Laser-induced local heating of multilayers. *Appl. Opt.*, 1982, 21(6): 1106~1114
- 4 唐晋发, 郑 权 编著. 应用薄膜光学. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 165~171

Improving the Laser Damage Resistivity of Aluminum Mirrors and Si Windows by Depositing Dielectric Protection Layers

Zhao Qiang Fan Zhengxiu Zhou Dongping Fan Ruiying Liu Liming
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract From the following two aspects: speeding up the heat conductance and reducing the optical absorption, we in this paper, propose a detailed means to improve the laser resistivity of aluminum mirrors and Si windows by depositing dielectric films. In the laser-induced damage test of suing a 1.06 μm infrared laser and a copper-vapor laser, the damage thresholds of samples that are being protected all have been improved, which in turn verifies the rationality of our protecting means. The feasibility of the method is discussed.

Key words heat conduction, optical absorption, damage threshold