

用于激光薄膜的保护膜

金 林 法

(中国科学院上海光机所)

提 要

利用 SiO_2 作为激光薄膜的保护膜, 可以提高抗激光强度 1~3 倍, 从等离子体闪光和薄膜缺陷破坏两个方面给出了解释。

Protective film in laser thin film

Jin Linfa

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

Abstract

Using SiO_2 as protective film laser thin film can raise the laser-resistant intensity by 1~2 fold. It is elucidated from both the plasma flash and the damage of thin film flaws.

引 言

激光薄膜与一般光学薄膜相比较, 最突出的一点, 它要能承受一定的激光强度。例如, 一般蒸发工艺涂制的 TiO_2 薄膜, 可以在宽带增透膜和冷光膜中得到应用, 但不能用作激光薄膜, 因为它很容易被激光烧坏。随着激光能量和功率水平不断提高, 薄膜抗激光破坏的问题也就愈来愈得到重视。为了提高薄膜抗激光强度, 许多薄膜工作者对破坏机理、镀膜材料、镀膜工艺等各个方面进行了大量的研究, 虽已取得了一些成绩, 但还不能大幅度地提高薄膜抗激光强度。

我们研究用保护膜的方法来提提高薄膜的抗激光强度, 结果表明保护膜是制作抗激光强度膜的一种行之有效的办法。

实 验 与 结 果

在光学薄膜中经常采用 H 和 L 表示 $\frac{\lambda}{4}$ 光学厚度的高低折射率薄膜, 对激光反射膜的膜系可写为 $(HL)^m H$ (m 为正整数)。例如 ZrO_2 和 SiO_2 全反射膜即为 $(HL)^{11} H$ 。从薄膜光学的基本原理出发, 在上面膜系后面再涂 $\frac{\lambda}{2}$ 整数倍的附加层, 对激光薄膜在工作波长处的光谱特性是没有影响的, 所以镀了保护膜以后的膜系可写为 $(HL)^m H 2nL'$ (n 为正整数)。现在, 只要选择一种材料, 使得镀上去以后, 能保持原来激光硬膜的优点, 又能提高薄膜抗激光强度的本领, 这就起到了保护膜的作用。经过对一系列材料进行激光

收稿日期: 1979年7月12日。

破坏试验, 我们采用了 SiO_2 薄膜作为保护膜, 因为 SiO_2 有一些独特的优点: 在波长 $0.2\sim 5$ 微米范围内是透明的, 吸收可忽略不计; 具有高的熔点 (1728°C); 薄膜有极高的机械强度, 也不易潮解; 具有网络形结构; 填充密度为 $0.98^{[1]}$, 已接近于 1; 薄膜表面形态好, 即颗粒度比较细小, 直径约在 250\AA 左右, 而且大小比较均匀; 具有高的破坏阈值 (100 焦耳/毫米² 以上); 随着薄膜厚度的增加, 阈值几乎不下降, 但其它一些常用材料则要显著地下降, 见表 1。

表 1 四种单层膜厚度与阈值的关系

阈值 材料	厚度 $\frac{\lambda}{4}$ ($\lambda=1.06\mu$)	$\frac{2}{4}\lambda$	$\frac{3}{4}\lambda$	$\frac{4}{4}\lambda$	$\frac{5}{4}\lambda$	$\frac{6}{4}\lambda$	$\frac{7}{4}\lambda$
		焦耳/毫米 ²					
SiO_2	120	120	—	110	—	110	—
ZrO_2	90	50	22	20	35	22	17
ZnS	57	27	22	20	14		
MgF_2	100	64	55	膜层破裂			

从表中可以看到, 只有 SiO_2 材料随着厚度的增加能保持 100 焦耳/毫米² 以上的破坏阈值, 而其它三种材料则要显著地下降。正是

表 3 涂了不同厚度保护膜的全反射膜

膜系 阈值	$(HL)^{10}H$	$(HL)^{10}H2L$	$(HL)^{10}H4L$	$(HL)^{10}H6L$	$(HL)^{10}H8L$	$(HL)^{10}H10L$	$(HL)^{10}H12L$
焦耳/毫米 ²	20	30	44	44	41	35	21

表 4 在大功率激光作用下薄膜的破坏阈值

编号	膜系	材料	平均阈值(瓦/厘米 ²)	编号	膜系	材料	平均阈值(瓦/厘米 ²)
1	HL	$\text{ZrO}_2, \text{SiO}_2$	1.5×10^{10}	5	HL+4L	$\text{TiO}_2, \text{SiO}_2$	2.3×10^{10}
2	HL+4L	$\text{ZrO}_2, \text{SiO}_2$	3.7×10^{10}	6	$(HL)^2H$	$\text{ZrO}_2, \text{SiO}_2$	2.3×10^{10}
3	4L+HL+4L	$\text{ZrO}_2, \text{SiO}_2$	$>3.7 \times 10^{10}$	7	$(HL)^2H+4L$	$\text{ZrO}_2, \text{SiO}_2$	$>3.7 \times 10^{10}$
4	HL	$\text{TiO}_2, \text{SiO}_2$	1.5×10^{10}				

由于 SiO_2 有这一特点, 才最适合用作保护膜的材料, 并取得了理想的结果。下面列出一些破坏试验结果:

1. 在能量激光器中试验结果

采用脉冲时间为 6 毫秒输出波长 1.06 微米的钕玻璃激光器, 对各种样品进行破坏试验, 结果见表 2 和表 3。

表 2 半反射激光薄膜的破坏阈值

不镀保护膜		涂保护膜后	
膜系	阈值 (焦耳/毫米 ²)	膜系	阈值 (焦耳/毫米 ²)
$(HL)^2H$	13	$(HL)^2H2L$	24
$(HL)^2H$	18	$(HL)^2H4L$	80
$(H5L)^2H$	25	$(H5L)^2H2L$	39
$(H5L)^2H$	35	$(H5L)^2H4L$	110

对 1.06 微米波长的膜片, 在涂了保护膜以后, 有一半左右的膜片破坏阈值要提高 $1\sim 3$ 倍, 涂 $4L$ 膜系即光学厚度为 λ 的保护膜比涂 $2L$ 膜系的效果要好。

从表中可以看到, 涂了保护膜以后, 激光反射膜的抗激光强度有很大提高, 在厚度为 $\lambda\sim 2\lambda$ 范围时效果最好。

2. 在大功率激光器中的试验结果

采用光脉冲时间宽度为 100 微微秒的 1.06 微米锁模激光器输出的脉冲序列对样品进行破坏试验, 结果如表 4 所示。

从表 4 可看到, 在大功率激光中, 涂了保护膜以后的双层膜以及五层膜的破坏阈值均有大幅度的提高。由于功率破坏试验做得不多, 所以数据不全面, 需要进一步地做工作。

分析讨论

1. SiO_2 保护膜的机理

在激光作用下, 薄膜的破坏因素是很复杂的, 它不仅与薄膜材料, 薄膜的制备工艺以及薄膜的各种性质有关, 而且与激光本身的各种特性有关。我们认为如下两方面是主要的。

(1) 提高了等离子体闪光破坏的强度

当薄膜被激光所破坏时, 总是伴随着从薄膜表面本身喷出的材料所组成的发光等离子体, 这种等离子体闪光随着膜层破坏的发生而发生, 随着膜层破坏过程的结束而结束。等离子体闪光是由于激光与薄膜作用时, 成膜物质被激光加热离化, 产生电子雪崩的结果。由于多种原因, 在薄膜中原来就存在一定数量的初始电子, 在强激光场作用下, 它们有可能产生电子雪崩。电子雪崩就意味着这些自由电子要从激光场中吸收大量的能量, 使薄膜加热离化, 产生等离子体闪光, 这时薄膜也就发生了破坏。对于 SiO_2 薄膜, 由于它的致密性好, 电子在其中的自由程很短, 而且它的离化能又高, 所以形成电子雪崩的几率要小得多, 不容易产生等离子体闪光。把这种 SiO_2 薄膜作为保护膜涂在激光薄膜外面, 相当于给已涂好的薄膜外面加上一层屏障, 使高温下较易热离化的 ZrO_2 与空气隔绝, 可限制其等离子体的发展, 从而使薄膜的抗激光强度得到提高。

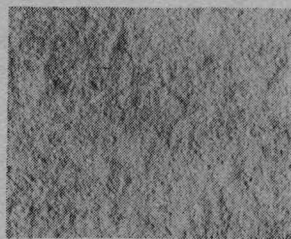
(2) 减少了薄膜缺陷破坏

如果减少了薄膜中的缺陷, 也可以相应地提高薄膜的抗激光强度。

我们利用电子显微镜对薄膜表面进行分析, 可以看到涂了一定厚度的 SiO_2 保护膜以后表面形态有了很大改善(见照片)。



照片 1 放大 2×10^4 倍, 未涂保护膜



照片 2 放大 2×10^4 倍, 涂 $\frac{6}{4} \lambda$ 保护膜

照片 1 是没有涂保护膜的 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 二十一层反射膜表面的电子显微镜照片, 其表面很不平整, 存在着各种缺陷。照片 2 是涂了 $\frac{6}{4} \lambda$ 厚度的 SiO_2 保护膜的二十一层 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 表面形态, 显然涂了保护膜以后表面形态很好, 各种缺陷大大减少。

2. SiO_2 保护膜的厚度问题

由于被保护的激光薄膜的外层很粗糙, $\frac{\lambda}{2}$ 厚度的 SiO_2 保护膜还不够厚, 薄膜表面还有缺陷存在, 因而保护效果也就不佳。只有当到了一定厚度, 例 $\lambda \sim 2\lambda$ 厚度时, 才使表面形态比较平整, 缺陷显著地减少, 这时保护效果最好。但是保护膜涂得再厚(超过 2λ 厚度), 则由于 SiO_2 薄膜本身的内应力导致可能出现裂纹, 使表面形态再次出现不平整和某些缺陷。我们用光学显微镜, 甚至用肉眼就可以观察到这种裂纹。从“等离子体闪光”考虑也有同样的道理, 若保护膜太薄, 则 ZrO_2 与空气的隔绝不太理想, 只有当到了一

定厚度才能使之完全隔绝起来。而当 SiO_2 保护膜太厚出现裂纹以后,就起不到屏障的作用了,等离子体也可以从这些裂纹中冲出,并得到充分发展,最终使薄膜被烧坏或被冲击波撞坏。

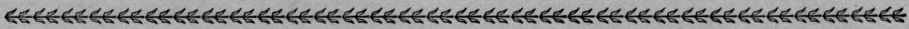
3. SiO_2 保护膜有可能降低激光薄膜的损耗

激光硬膜的损耗是比较大的,一般在 0.3% 至 1%,其中吸收损耗是比较小的,而

主要是由于光的散射引起的,既然涂了保护膜以后可以改善薄膜表面质量,所以涂了保护膜以后,可以减少光的表面散射,从而降低激光薄膜的损耗,尤其对 45° 反射膜可能效果更好。目前由于散射还不能精确测量,所以缺少具体的数据,有待后来验证。

参 考 文 献

[1] *Appl. Opt.*, 1976, 15, No. 10, 2318~2322.



简 明 通 讯

后向散射激光多普勒测速仪研制成功

我国第一台连续扫描的后向散射激光多普勒测速仪,在上海进行了科研成果鉴定。

该激光测速仪是利用光学多普勒效应的新型测速仪器,具有如下特点:在被测点同侧进行测量,使用比较方便,能适合较多的场合;该机配有数控扫描装置,能在很短时间内自动测出流场任意截面的速

度分布。为造船设计研究中空泡水筒不均匀流场的测量提供了一种有效的测量手段。

该项成果被评为上海市 1979 年科研成果三等奖。

(上海市激光技术研究所 俞尧民)

2000 小时室温连续电激励 CO 激光器

作为一种实用激光器,要求高功率、高效率、长寿命,结构紧凑,使用方便。最近我们在 CO 激光器上实现了这些要求。CO 分子激光器输出波长 $5\sim 6$ 微米,处于分子光谱学的“指纹区”,在光谱学、光学等方面有着广泛的用途,尤其作为自旋反转喇曼激光器的泵浦源,更有其独特的应用。

我们研制的一台铜阴极室温 CO 激光器,有效放

电长度 1 米,水冷温度一般在 20°C 以上,最高水温达 34.5°C ,已实现了超过 2000 小时工作寿命的运转,电转换效率为 11.5%,输出功率在 6 瓦以上(在 850 小时还有 13 瓦),并始终保持 TEM₀₀ 模。

(中国科学院安徽光机所

邵立金 张金祥 李晓莉 杨新元)