

文章编号: 1001-4322(2003)11-1053-04

# 用 1 064nm 激光增强 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 薄膜的 抗激光损伤能力的实验研究\*

胡建平, 马 平, 许 乔

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 用 1 064nm 激光实验研究了  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  薄膜的激光损伤增强效应, 实验以薄膜激光损伤阈值 70% 的激光能量开始, 采用 N-ON-1 方式处理薄膜, 激光脉冲的能量增量为  $5\text{J}/\text{cm}^2$ 。实验结果表明, 激光处理薄膜表面能使激光损伤阈值平均提高到 3 倍左右, 并且薄膜的损伤尺度也明显减小。对有缺陷的薄膜, 其缺陷经低能量激光后熔和消除, 其抗激光损伤能力得到增强, 但增强得并不显著, 而薄膜本身的激光预处理, 可以使其激光损伤阈值大大提高。

**关键词:** 激光损伤; 激光预处理;  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  高反膜

中图分类号: TN246

文献标识码: A

光学薄膜的激光损伤是影响高功率激光器提高激光输出功率的关键因素之一, 激光损伤不仅降低激光的输出质量, 造成光束波前和相位的畸变, 而且调制激光光束, 对激光器造成灾难性的损坏<sup>[1]</sup>。

为了提高薄膜的抗激光损伤能力, 国内外对激光薄膜的损伤机理和增强薄膜抗激光损伤能力的技术途径展开了深入研究<sup>[2~4]</sup>, 实验发现激光薄膜经 1 064nm 激光辐照后, 薄膜的激光损伤阈值大幅度提高, 此技术也称激光预处理技术, 即激光以低于薄膜的激光损伤阈值的能量开始, 并按一定规律增加激光能量来照射扫描膜片, 膜片的抗激光损伤特性得到较大的改善<sup>[5~8]</sup>。本文针对  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  膜料镀制的 1 064nm 激光薄膜进行了激光预处理实验, 研究了薄膜的激光后处理和激光损伤的关系, 结果表明: 激光预处理技术能大幅度提高薄膜的激光损伤阈值, 平均提高到 3 倍左右。

## 1 实验装置和方式

激光预处理实验系统是由单纵模 Nd: YAG 调 Q 激光器, He-Ne 激光准直光源, 分光光楔, 3m 聚焦凸镜, 样品精密移动平台, 能量计和 CCD 光束分析仪组成。激光由 Nd: YAG 调 Q 脉冲激光器输出, 激光输出模式  $\text{TEM}_{00}$ , 波长 1 064nm, 脉宽 (FWHM) 为 10ns, 最大脉冲能量 1.5J, 能量稳定度为  $\pm 5\%$ 。样品平台可向 X-Y-Z 三方向移动, 能保证激光光斑在薄膜不同区域进行激光预处理。激光能量用美国 EM500 大能量探头能量计测量, 测量误差小于  $\pm 1\%$ , 激光光斑的有效面积用 CCD 光束分析仪测量, 其激光脉冲的空间分布如图 1 所示, 测得光斑平均等效面积为  $1.045\text{mm}^2$ 。

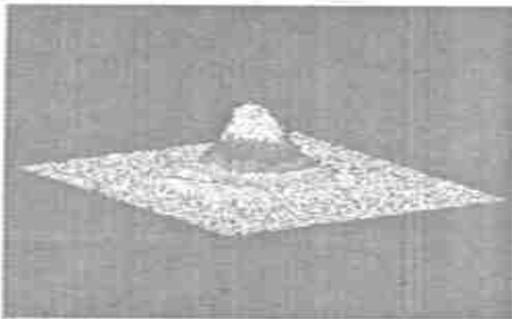


Fig. 1 Space profile of the laser  
图 1 激光光斑的空间分布

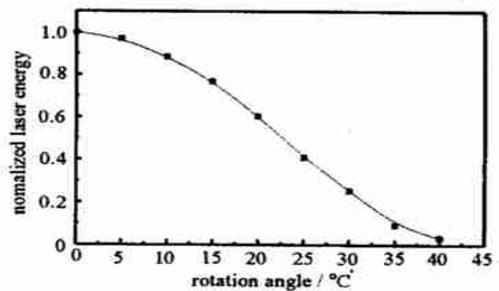


Fig. 2 Laser energy output vs rotating degree of half-wave plate  
图 2 半波片的转动角度和激光能量输出

\* 收稿日期: 2003-04-22; 修订日期: 2003-06-09

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 胡建平(1964-), 男, 副研究员, 现主要从事薄膜激光损伤阈值研究; 成都 450 信箱; E-mail: hujp2000@sohu.com。

薄膜的激光预处理实验采用不连续多次激光脉冲照射样品薄膜唯一点的一一对应即  $N$ -ON-1 方式, 首先用 1-ON-1 的激光损伤阈值测量方式测量薄膜的激光损伤阈值, 以能量密度低于激光损伤阈值的激光起始照射样品, 然后按一定方式升高激光脉冲的能量, 直至薄膜发生严重的激光损伤。

激光能量由半波片和偏振片组成的光路来调节, 波片为 1 064nm 零级半波片, 偏振片对 1 064nm 的 P 光透过率大于 95%, 消光比大于 200。由于激光器输出的 1 064nm 激光为线偏振光, 当通过半波片时, 随着半波片的转动, 线偏振光的偏振方向也随着发生变化, 因此通过偏振片的激光能量也会发生变化, 从而调节了激光能量。实验测得的能量调节曲线如图 2 所示, 激光输出能量随波片的转动呈余弦均匀变化。

## 2 实验结果及分析

激光预处理的实验样品为用电子束蒸镀而成的 1 064nm  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  高反膜, 膜系为  $G/(\text{HL})^{11}\text{H}2\text{L}/\text{A}$ , 其中 G 表示基片, H 表示  $\text{HfO}_2$  高折射率材料, L 表示低折射率材料, A 表示空气, 最外层加镀了  $\text{SiO}_2$  半波覆盖层。首先, 测量实验样品的激光损伤阈值。对于 1 064nm 激光, 在经过激光预处理之前, 该高反膜的激光损伤阈值为  $14\text{J}/\text{cm}^2$ , 以损伤阈值能量密度 70% 左右的激光能量开始照射膜片, 每个激光脉冲的能量密度增量为  $5\text{J}/\text{cm}^2$ , 直到膜片发生严重的激光损伤。

$\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  高反薄膜经过 1 064nm 激光预处理后, 薄膜的激光损伤阈值分布如图 3 所示, 薄膜的抗激光损伤能力大幅度提高, 激光损伤阈值提高较低的也达到  $28\text{J}/\text{cm}^2$ , 最高的达到  $60\text{J}/\text{cm}^2$ , 平均为  $42.85\text{J}/\text{cm}^2$ , 相对于原来的激光损伤阈值  $14\text{J}/\text{cm}^2$ , 激光损伤阈值平均提高到 3 倍。

不同的激光预处理效果与不同的预处理机理有关。由实验可以得出, 采用激光预处理技术提高了薄膜的抗激光损伤能力, 原因之一是对薄膜的损伤缺陷进行了预处理, 由于薄膜在低能量密度下的激光损伤主要由节瘤缺陷引起, 因而经激光预处理后, 薄膜的潜在激光损伤诱导源得到一定程度的减轻和清除, 从而提高了薄膜激光损伤能量; 其二是薄膜本身的激光预处理, 激光与薄膜的相互作用改善了薄膜的应力匹配, 降低了薄膜的电子缺陷密度。从薄膜的激光预处理的过程可以看出, 有的激光预处理区域, 在  $18\text{J}/\text{cm}^2$  处, 有轻微激光损伤发生 (见图 4(a)), 激光损伤面较小, 一般小于  $50\mu\text{m}$ , 但对后续激光脉冲, 即使按一定比率增加激光能量, 也不会发生进一步的激光损伤, 直至  $60\text{J}/\text{cm}^2$  为止, 而有的激光处理区域没有上述现象发生 (见图 4(b)), 这也说明了薄膜预处理的机理是不一样的。前者激光轻微损伤主要是薄膜的节瘤缺陷造成的, 激光预处理对损伤缺陷本身有一定的预熔的清除效果, 但效果并不显著, (只是激光损伤阈值从  $14\text{J}/\text{cm}^2$  增加到  $18\text{J}/\text{cm}^2$  左右), 效果显著的主要是薄膜本身的激光预处理。薄膜本身的激光损伤阈值 (除掉薄膜缺陷引起的激光损伤效应) 可以假设为损伤的临界激光能量密度, 为  $20.8\text{J}/\text{cm}^2$ 。经激光预处理后, 薄膜的激光损伤阈值达  $60\text{J}/\text{cm}^2$ , 提高到 3 倍左右。

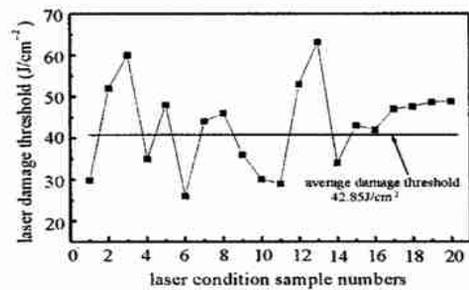


Fig. 3 Damage threshold of  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  coatings after laser conditioning

图 3  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  高反薄膜激光预处理的损伤阈值

从薄膜的激光预处理的过程可以看出, 有的激光预处理区域, 在  $18\text{J}/\text{cm}^2$  处, 有轻微激光损伤发生 (见图 4(a)), 激光损伤面较小, 一般小于  $50\mu\text{m}$ , 但对后续激光脉冲, 即使按一定比率增加激光能量, 也不会发生进一步的激光损伤, 直至  $60\text{J}/\text{cm}^2$  为止, 而有的激光处理区域没有上述现象发生 (见图 4(b)), 这也说明了薄膜预处理的机理是不一样的。前者激光轻微损伤主要是薄膜的节瘤缺陷造成的, 激光预处理对损伤缺陷本身有一定的预熔的清除效果, 但效果并不显著, (只是激光损伤阈值从  $14\text{J}/\text{cm}^2$  增加到  $18\text{J}/\text{cm}^2$  左右), 效果显著的主要是薄膜本身的激光预处理。薄膜本身的激光损伤阈值 (除掉薄膜缺陷引起的激光损伤效应) 可以假设为损伤的临界激光能量密度, 为  $20.8\text{J}/\text{cm}^2$ 。经激光预处理后, 薄膜的激光损伤阈值达  $60\text{J}/\text{cm}^2$ , 提高到 3 倍左右。

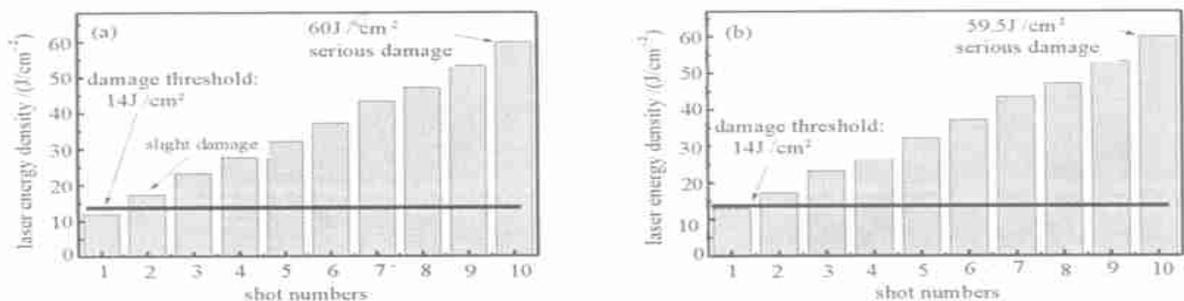


Fig. 4 Process of laser conditioning

图 4 激光预处理的效果

图 5 为薄膜受激光损伤和经激光预处理后的损伤图貌。从损伤图貌看出, 薄膜经激光预处理后, 虽然激光损伤能量提高到 2~3 倍, 但激光损伤的严重程度要比没有激光预处理的低。这主要因为缺陷经激光低能量照

射后,有些缺陷得到减轻和清除,没有得到清除的缺陷由于激光能量密度较低而引爆,损伤面也较小,另外激光预处理清除薄膜的微吸收缺陷,改善薄膜的应力,也使得膜面的激光损伤程度降低。

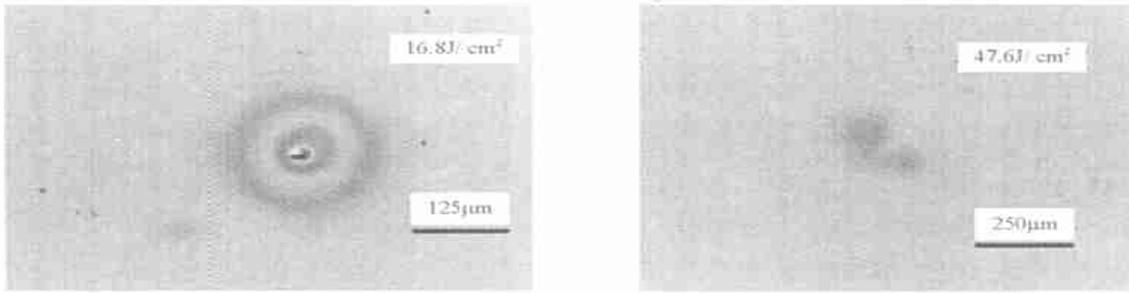


Fig. 5 Laser damage morphologies of HR coatings

图 5 薄膜激光损伤图貌

薄膜经激光预处理和未经预处理的激光损伤尺度与激光能量的关系如图 6 所示,可以看出,没有经激光预处理的薄膜,其激光损伤尺度随激光能量的增大而增大,呈线性关系,而经过激光预处理后的薄膜,薄膜损伤面较小,与激光能量不呈线性关系,而是近似平台关系,在  $30 \sim 60 \text{ J/cm}^2$  区间内的损伤尺度基本在  $120 \mu\text{m}$  左右,因而激光预处理对高反膜而言,不仅提高了激光损伤阈值,而且降低了薄膜激光损伤的程度。

### 3 结 论

实验表明, $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  薄膜经过激光预处理后,薄膜的抗激光损伤能力得到大幅度的提高,较低的提高到 2 倍左右,最高的达到 5 倍,平均提高到 3 倍左右。另外,薄膜经激光预处理后,损伤尺度也明显减小。对有缺陷的薄膜其缺陷经低能量激光预熔和清除,其抗激光损伤能力得到增强,但增强得并不显著,只是从  $14 \text{ J/cm}^2$  增加到  $18 \text{ J/cm}^2$  左右,而薄膜本身的激光预处理效应,可以使其激光损伤阈值从  $20 \text{ J/cm}^2$  增加到  $60 \text{ J/cm}^2$  左右。

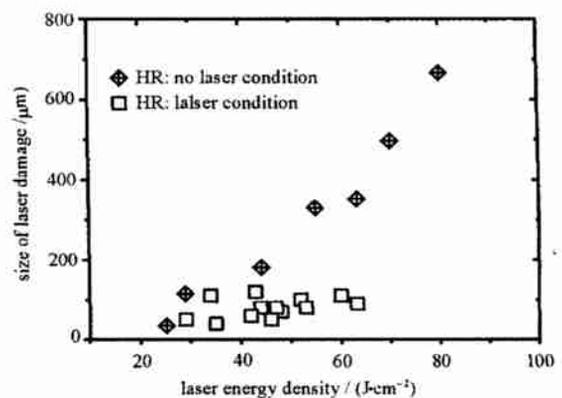


Fig. 6 Damage site diameter vs pulse laser energy density

图 6 激光能量密度与激光损伤尺度

### 参考文献:

- [1] Kozlowski M R, Thomas I M, Campbell J H, et al. High-power-optical coatings for a mega-joule class ICF laser[A]. Proc of SPIE on Thin Films for Optical Systems[C]. 1992, **1782**:105—119.
- [2] 胡建平,邱服民,付雄鹰.  $\text{SiO}_2$  半波覆盖层对  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  高反射膜激光损伤的影响[J]. 强激光与粒子束, 2001, **13**(2):137—141. (Hu J P, Qiu F M, Fu X Y. Effect of  $\lambda/2$  silica overcoat on laser damage of  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  high reflecting coating. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(2):137—141)
- [3] 付雄鹰,孔明东,胡建平. 波长 1064nm 脉冲激光高阈值反射膜的研制[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(4):413—417. (Fu X Y, Kong M D, Hu J P. The deposition of HR coating with high damage threshold for 1064nm laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(4):413—417)
- [4] Fournet C, Pinot B, Geenen B, et al. High damage threshold mirrors and polarizers in the  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$  and  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  Dielectrics Systems[A]. SPIE[C]. 1991, **1624**:282—293.
- [5] Wolfe C R, Kozlowski M R, Campbell J H, et al. Laser conditioning of optical thin films[A]. Proc of SPIE on Laser-Induced Damage in Optical Materials[C]. 1990, **1438**:360—375.
- [6] Kozlowski M R, Wolfe C R, Staggs M C, et al. Large-area laser conditioning of dielectric thin film mirrors[A]. Proc of SPIC on Laser-Induced Damage in Optical Materials[C]. 1990, **1438**:376—390.
- [7] Sheehan L, Kozlowski M R, Rainer F, et al. Large-area conditioning of optics for high-power laser systems[A]. Proc of SPIE on Laser-Induced Damage in Optical Materials[C]. 1994, **2114**:559—568.
- [8] Stolz C J, Sheehan L M, Maricle S M, et al. Laser conditioning methods of hafnia silica multilayer mirrors[R]. UCRL-JC-129318, 1998.

## Damage threshold improvement of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ coating by 1 064nm laser conditioning

HU Jiar-ping, MA Ping, XU Qiao

(*Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, P. O. Box 450, Chengdu 610041, China*)

**Abstract:** In this paper, the Nd:YAG laser with wavelength 1 064nm is used to study the improvement effect of damage threshold of  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  coating samples. The experiment of laser conditioning effect was taken by use of *N-on-1* mode, namely the irradiation energy density started from about 70 % of the damage threshold, and increased  $5\text{J}/\text{cm}^2$  energy pulse by pulse until serious damage appeared. The experiment results show that 1064nm laser irradiation can improve the damage threshold of  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  coating up to 3 times. The mechanisms of laser conditioning on  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  mirror are found in two forms: laser annealing and laser cleaning of coating. Laser annealing can increase the damage threshold of non-defective coating up to 3 times on the average. Laser cleaning means that coating defects such as nodular are cleaned by low energy density irradiation, and the coating damage threshold improved to a certain extent. The anti-damage ability of the coating can improve 3 times, and the effect is permanent.

**Key words:** Laser damage; Laser condition;  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  high reflecting coatings