

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0477-04

高功率激光膜层损伤过程研究

蒋晓东 黄祖鑫 任寰 唐灿

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

提要 光学膜层在强激光的辐照下,其损伤过程和损伤结果是多种多样的。通过系统研究几类常用膜层在不同条件下的激光破坏过程,发现通过控制激光辐照条件,可改变光学膜层的破坏方式和破坏程度,能安全可靠地提高光学元件损伤阈值,提升高功率激光系统的能量密度,达到预处理效果。研究了儿种不同膜层光学元件在预处理前后膜层表面的变化(损伤形貌)、损伤阈值的增幅,发现膜层仍然发生了一定程度的轻微损伤,这种损伤与膜层本身缺陷、激光参数密切相关,为预处理方法提高膜层损伤阈值提供了依据。

关键词 光学膜层, 损伤, 损伤形貌, 激光预处理

中图分类号 O484 文献标识码 A

Study of Laser Induced Damage of Optical Coatings

JIANG Xiao-dong HUANG Zu-xin REN Huan TANG Can

(Research Center of Laser Fusion, AEP, Mianyang 621900)

Abstract A new method to overcome defects of optical coatings was introduced. It was found that the micrographs of the laser induced damage of the coatings were different to each other when using different testing methods, and some damage sites were stable at repetitive shots. The experimental results show that damage threshold of optical coatings can be improved by laser conditioning.

Key words optical coating, damage, micrographs, laser conditioning

1 引言

在高功率激光装置的建造中,光学元件的损伤阈值(抗激光损伤能力)限制是一个主要瓶颈。在目前的技术水平和经费状况下,通过改进光学元件加工(如镀膜)工艺和增加口径来提高激光系统的负载能力是非常有限的。国外有关研究证明,对部分光学元件,激光预处理是一种有效的提高激光损伤阈值的方法,可提高达 2~3 倍^[1],国内目前还未对此进行系统的研究。因此,研究光学膜层的损伤机理和损伤过程变得非常迫切。在目前光学元件镀膜工艺的限制下,提高光学膜层损伤阈值的前提是对预处理机理有足够的认识和了解,使激光预处理工艺在效果和费用上达到最优化,以适合大批量作业。

2 实验原理

激光预处理过程是用强度逐渐增加的激光对待处理光学元件进行多次辐照,以提高其激光损伤阈

值。要达到好的效果,精密控制激光的能量增幅和时间间隔,而且需要很多次照射(最多可达几百次),这使预处理较大口径的光学元件成为耗费很高的工作。目前国际流行的激光预处理机理之一是缺陷清除机制^[2~4]。缺陷是相同类型光学膜层损伤的主要因素,这种缺陷是以一定的几率密度分布在光学元件表面,减少和消除缺陷就可提高元件的损伤阈值。降低损伤几率的方法只能通过降低膜层的缺陷(在镀膜阶段)或逐步减小和消除缺陷(在预处理过程)来达到。预处理过程可使缺陷逐渐消失形成稳定、轻微的损伤,避免缺陷被激光瞬间引发而使膜层发生大面积损坏。工作中对镀不同类型膜层的光学元件的损伤阈值进行了测量。研究了损伤及预处理后光学膜层的形貌,并对其性质和产生原因进行了分析。开展了两方面的实验:首先,研究了损伤对光学性能的影响(如透射反射率的损失)可以决定损害的有效尺寸或形貌;其次,研究了不同损伤在一定能量的激光连续照射下的稳定性,同时分析了影响膜层

激光引发损伤的各种因素,以探讨科学合理的光学元件预处理工艺及方法。

2.1 实验装置及器件

图 1 是实验装置图,实验中使用 Nd:YAG、单横单纵模调 Q 激光器,输出激光为 1064 nm 的近高斯光束,脉宽约 5 ns,输出单脉冲能量最大 800 mJ,光斑直径约为 8 mm。预处理时采用 $f=800$ mm 的透镜将光缩束。采用 Applo 微能量卡计,它具有实时测量能力;用快光电系统[TDS644 数字示波器+快光电管(响应时间 250 ps)]测脉宽,分别用感光胶片和科学 CCD 记录激光在靶面及近焦处的光斑直径和能量的空间分布,光散射信号用光电管+高通滤波器测量。膜层表面形貌及膜层缺陷的检测采用多种方法,包括相衬生物显微镜、暗场显微镜、原子力显微镜等,运用高精度透射仪检验膜层在实验前后透射率的变化。

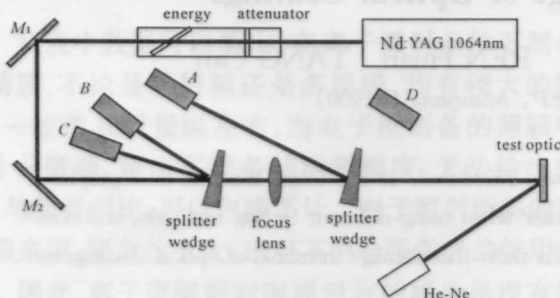


图 1 激光损伤测量装置示意图。A 为靶面激光能量空间分布测量;B、C 分别为激光能量和脉宽测量;D 为散射光测量

Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement for laser damage measuring. A: Measuring the laser energy optical distribution the target; B, C: Measuring the laser energy and the pulse duration; D: Measuring the scattering light

2.2 损伤阈值的测量及实验方法

实验中对样品的辐照采用三种方式,1-ON-1 方式,即将实验能量分段,每段能量辐射 10 个以上不同点,根据各能量段的损伤几率与能量作图,反推至零损伤几率时的能量密度即为该元件的损伤阈值。损伤测量用的激光束径为 0.6 mm; S-ON-1 方式,对同一点用相同能量连续照射,至损坏为止; R-ON-1 方式,对每一点采用能量逐步升高、连续照射的方法,直到损坏为止。

实验过程记录激光照射过程中测到的各种现象,包括等离子闪光、反射散射光、损伤形貌以及对应的能量。激光束径从 0.6 mm 至 1.2 mm。为便于对比实验,损伤实验在同一块元件上的不同区域

(以扇形分区)。

3 结果与分析

3.1 光学膜层的损伤及形貌

在对被破坏的镜片的显微观察中主要有以下几类损伤形貌:剥层状损坏,坑状损坏,熔融坑形损坏,溅射形损坏等。

剥层损伤主要发生在高反射膜上,比较常见,见图 2A。在显微镜下可观察到边缘轮廓清晰的损伤斑,并可看到层状剥落,这种损伤通常发生在激光能流较高的情况下(约 30 J/cm^2 以上),有这一类损伤的元件的损伤阈值一般较高,但此类损伤极不稳定,连续的激光(能量密度略低于阈值)辐照会发生更大的损坏。坑形损伤最常见,在多层反射膜和单层增透膜上均有发生,其面积较小,一般为几微米到几十微米的量级(如图 2B)。对比膜层损伤前后的状况可以发现坑形损伤与膜层密切相关。通过显微镜观察,易产生这类损伤的镜片一般都有缺陷或膜层内容物,但缺陷的密度很小,元件表面总体很光洁。这类损伤一般发生在激光能量密度在约 $15 \sim 20 \text{ J/cm}^2$ 时。坑形损伤在持续激光照射下的行为比较复杂,有的可以长期稳定(一般直径小于 $10 \mu\text{m}$),有的损伤却会很快扩展。熔融坑形损伤具有类似金属融化时产生的光滑的凹坑,但发生几率不高,产生原因也可能和缺陷有关。熔融坑形损伤比坑形损伤稳定,见图 2C。溅射损伤和膜层材料有关,主要发生在反射膜(外层为 ZrO_2)或单层锆膜的严重损伤中,这种损伤常在较高激光通量时产生,在较低能量激光连续辐照下也会形成溅射损伤,损伤形貌类似陨石坑,周围有膜料物质呈放射状喷出,造成膜层的严重破坏,见图 2D。

3.2 膜层损伤过程分析

用较低能量(远低于损伤阈值)对 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 高反膜和 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 增透膜三种膜层按逐渐递增的方式连续照射(R-ON-1),图 3(a)是三种膜层在激光照射过程中对 He-Ne 激光的散射强度变化。在散射光强度明显增加的能量下,膜层也发生损坏,在显微镜下可以看到明显的损坏斑,在损坏后散射光强度的降低是由于照射点膜层被彻底剥掉造成的。几乎每一实验点在损坏前的较低能量下都会伴随多次的微弱闪光,但在普通显微镜下并没有明显的痕迹,也没有影响膜层的透射或反射。多次实验发现,对相同的镜片,不仅损伤阈值相同,发

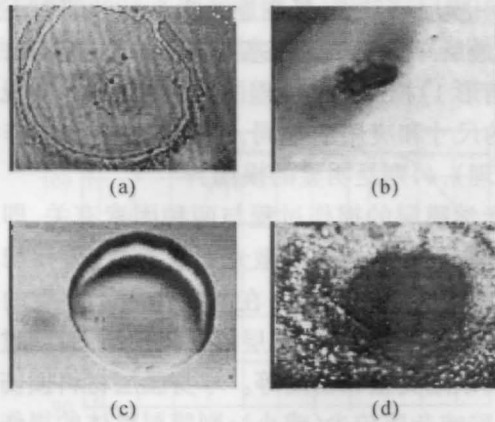


图2 四种典型损伤形貌

Fig. 2 Optical micrographs of damage site on the mirror
生闪光的次数和能量密度也基本相同。改变照射能量间隔,能量的间隔较大时,在发生闪光的能量段膜层已严重损伤,图3(b)是 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 反射膜在不同照射次数的散射强度变化,在细间隔能量扫描的情况下,膜层发生损伤的能量密度增大。另外两种膜层现象不太一样,不同能量间隔扫描对 $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ 增透膜损伤能量值影响不大,这类增透膜层数较少,膜层缺陷很少。 $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 高反膜有相反的效应,

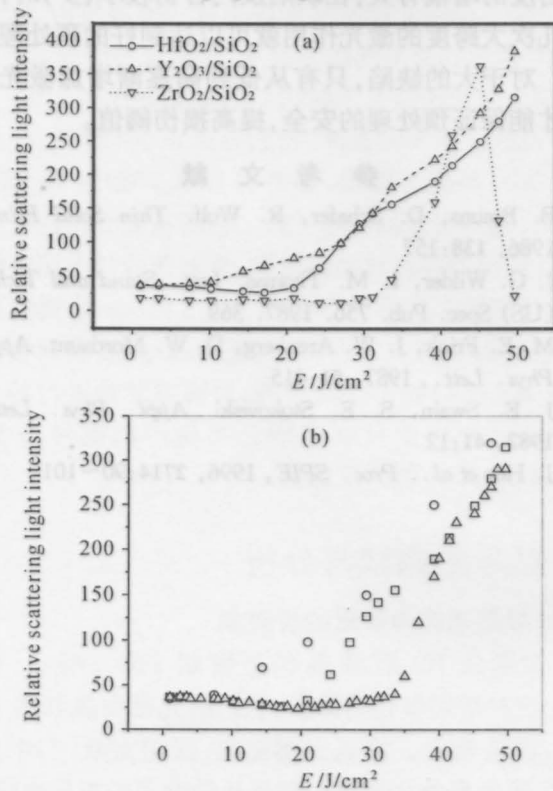


图3 R-ON-1方式照射下膜层散射随激光通量的变化

Fig. 3 The scatter diagnostic via laser fluence using R-ON-1 testing method on the samples

以1-ON-1方式测得阈值较R-ON-1方式测得的阈值高,显然连续扫描照射更易造成损伤,由于照射频率低于1 Hz,不可能是热积累导致损伤,应该是微小损伤的空间积累加剧了膜层的破坏。

图4是1号样品($\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$)和2号样品($\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$)膜层在未损坏前的原子力显微图像,A,C是在激光照射前,B,D是在适当能量照射后,在原子力显微镜下可以看到,样品1膜层中的突起物(可能是镀膜过程中产生的结核型缺陷)在较低能量照射后消失了,在一定范围内继续提高能量照射,膜层仍不会发生明显的破坏;而样品2随着能量的增加,膜层表面发生连续的变化,膜层变得粗糙,散射也增强,所以导致吸收增加,更容易发生严重破坏。显然,在较低能量下,样品1虽然产生微弱的火花,但再提高能量照射却没有什麼现象,说明在此过程中微小缺陷或杂质被逐渐消除,或者改善了缺陷类型,避免了直接以较高能量照射时,缺陷剧烈爆发引起周围膜层严重损坏。显微镜下看样品2的表面较粗糙,可能是镀膜工艺或是膜层材料本身的原因,膜层在连续激光照射下不断劣化,并很快发生严重损坏。

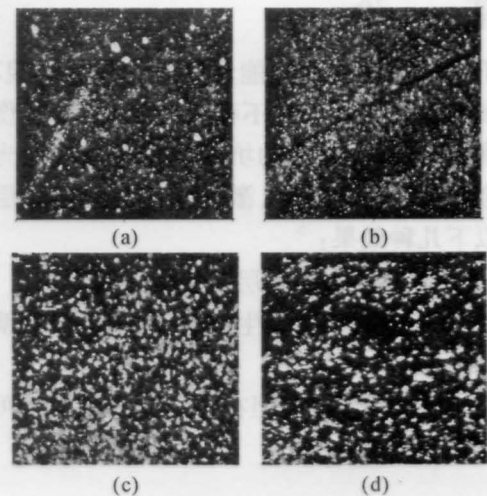


图4 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ (A,B)和 $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (C,D)膜层在照射前后的原子力显微图像

Fig. 4 The AFM image of unconditioned area (A,C) and radiated area (B,D) of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ and $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ films

对膜层缺陷的清除是一个量变过程,在合适的能量下,去除缺陷并不会留下明显的痕迹,如果起始照射能量增加,则可能在膜层表面产生明显的变化(微小损伤),即使是这些微型损伤,随尺寸的不同在连续激光作用下也会有不同的表现。图5所示是同一膜层上不同微损伤在连续激光下的稳定性。对几十微米大小的损伤,在连续激光(略低于损伤阈值)

照射下,损坏不断增加,经过几次照射,就导致玻璃基体的损坏(图 5A→B);而对于几微米的损伤,在同样激光的作用下,经过几十次照射,损伤尺寸仍没有明显变化(图 5(C→D)),具有很好的稳定性。

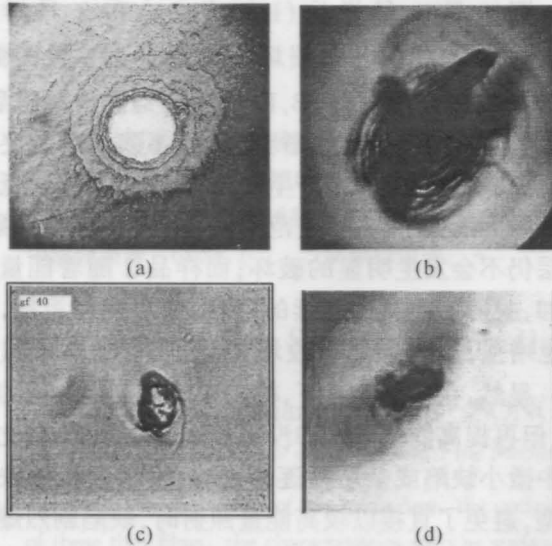


图 5 不同类型损伤在连续激光下的稳定性

Fig. 5 The stability of different damage site at repetitive shots

4 结 论

不同的膜层和激光能量导致的损伤形貌不同。剥层和溅射损伤是非常不稳定的损伤,在损伤判定时是确定无疑的,较大的坑形损伤在连续激光照射下也会扩展。总的说来,激光作用在光学膜层上主要有以下几种效果:

- 1) 光学元件表面膜层不发生任何变化;
- 2) 膜层表面结构发生细微变化,但没有明显破损;
- 3) 膜层局部破损,但在一定激光能流下可以保持稳定而不扩展;

4) 膜层有破损,且在连续激光脉冲照射下发生扩展,最后导致光学元件基底损坏。

情形 1) 相当于预处理的结果, 2) 和 3) 则视光学元件的尺寸和应用的不同, 可定义为损伤或非损伤(预处理), 4) 则是明显的损伤。

光学膜层的损伤过程与两种因素有关, 即膜层的内在质量和预处理的激光能量参数(包括初始能量、能量增量、频率等)。在激光作用下膜层的表现决定于激光扫描方式、膜层的材料性质、镀膜过程中产生的缺陷类型和密度等。本身膜层材料损伤阈值高, 缺陷或杂质较少(或小), 则膜层整体的损伤阈值较高, 并且通过预处理方式逐步消除缺陷或改变缺陷类型, 可能使损伤阈值大幅度增加; 膜层本身材料较差, 或缺陷密度太大, 则损伤阈值很低, 连续激光照射往往使损伤积累, 形成损坏。

激光预处理作用机制有两方面: 膜层表面结构改善, 这种变化一般发生在较高的激光能流密度下, 膜层本身质量好, 所以对阈值的提高作用不大; 另一种是膜层缺陷(包括表面污染物)和包含物消除机制, 这种预处理机制的效果与缺陷的大小和激光能流密度的增幅有关, 在缺陷及内含物较小(少)时, 很少几次大跨度的激光作用就可以达到好的预处理效果。对于大的缺陷, 只有从低到高逐渐增加激光能量才能保证预处理的安全, 提高损伤阈值。

参 考 文 献

- 1 B. Brauns, D. Schafer, R. Wolf. *Thin Solid Films*, 1986, **138**:157
- 2 J. G. Wilder, I. M. Thomas. *Inst. Stand and Tech.*, (US) Spec. Pub. 756. 1987. 369
- 3 M. E. Frink, J. W. Arenberg, D. W. Mordaunt. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**:415
- 4 J. E. Swain, S. E. Stokowski. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**:12
- 5 J. Hue et al.. *Proc. SPIE*, 1996, **2714**:90~101