

等离子体烧蚀引起光束调制的功率谱密度计算

郭 猛^{1,2} 李大伟¹ 吴建波^{1,2} 王 虎^{1,2} 何 骏^{1,2} 王岳亮^{1,2} 柴英杰^{1,2} 符燕燕^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用电子束蒸发制备了1064 nm高反膜样品,并通过激光预处理系统对样品表面的部分区域进行了光栅式扫描,形成等离子体烧蚀区域。搭建了光束质量测试系统,记录在样品表面有无等离子体烧蚀两种情况下的反射光束的空间强度分布。采用经典周期图法,分别计算了各自的强度分布的功率谱密度。结果表明,等离子体烧蚀导致的传输光束峰值强度对应于功率谱密度曲线中心峰值强度,而周期性起伏则体现在相应频率下的峰值。因此功率谱密度曲线可以作为表征光学元件对传输光束调制的手段。

关键词 表面光学; 激光预处理; 光束调制; 功率谱密度; 等离子体烧蚀

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0202001

Calculation of Power Spectral Density of Beam Modulation Induced by Plasma Scalds

Guo Meng^{1,2} Li Dawei¹ Wu Jianbo^{1,2} Wang Hu^{1,2} He Jun^{1,2}

Wang Yueliang^{1,2} Chai Yingjie^{1,2} Fu Yanyan^{1,2}

¹Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The 1064 nm high reflectors are prepared by e-beam deposition, and via laser conditioning with raster scanning on certain areas, plasma scalds are formed on the surface. The beam quality testing system is built. The spatial intensity distribution of laser beam reflected by the samples with or without plasma scalds is recorded. The power spectral density of laser beam is calculated with periodogram method. The results indicate that the peak of the power spectral density corresponds to the peak intensity of the transmitted beam which is modulated by plasma scalds. Therefore the modulation of transmitted laser beam can be analyzed and characterized using the power spectral density calculated from the distribution of the laser beam.

Key words optics at surfaces; laser conditioning; beam modulation; power spectral density; plasma scalds

OCIS codes 350.1820; 140.3330; 010.3310

1 引 言

光学薄膜元件是激光系统中必不可少,同时也是最为薄弱的环节。随着激光输出能量的不断提高,高功率激光系统对光学薄膜元件的抗激光损伤性能要求也越来越高^[1-2]。单纯的依赖制备材料以及制备工艺的改进^[3]来提高光学薄膜的抗激光损伤能力的成本是高昂的,并且往往受到诸多外围因素的限制而无法实

收稿日期: 2014-08-11; 收到修改稿日期: 2014-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(61107080)

作者简介: 郭 猛(1988—),男,硕士,主要从事光学薄膜损伤方面的研究。E-mail: 18217350396@163.com

导师简介: 李大伟(1978—),男,博士,副研究员,主要从事光学薄膜损伤测试及机理、激光预处理等方面的研究。

E-mail: lidawei@siom.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊多 www.opticsjournal.net

现。但激光预处理、热处理以及离子后处理等手段,凭借其成本低、效果佳的优势得以发展。其中激光预处理逐渐成为了提高光学薄膜损伤阈值的主要手段,特别是对于 1064 nm 波长的反射膜^[4-6]。

激光预处理^[7]是在偶然的情况下发现的。以低于损伤阈值的激光辐照可以提高光学薄膜元件的抗激光损伤能力,这种亚阈值照射被称为“激光预处理”或“激光退火”。20世纪90年代 Taniguchi 等^[8]提出了功能性损伤阈值的概念,用来评估元件对激光通量的负载能力。所谓功能性损伤阈值,就是指激光辐照之后引起光学元件的变化不足以影响系统整体性能的最大能量密度。该定义下损伤产生与否是以整个激光系统是否正常运行作为评价标准,使得激光预处理具备了实际应用的前提与基础。

对于 1064 nm 的高反介质膜元件而言,等离子体烧蚀是激光预处理过程中的典型形貌^[9-10]。在功能性损伤阈值定义下允许一定程度的等离子体烧蚀存在,但经过元件后传输光束特性仍然会有所变化,表现为波前相位畸变、光强局部增强以及周期性调制等^[11],特别是当等离子体烧蚀密度达到一定程度后,其对光束质量^[12]的调制作用可能会影响光学系统的整体表现,甚至损伤光路下游元件。目前为止,关于系统研究等离子体烧蚀对传输光束的调制工作尚且不多,因此有必要研究等离子体烧蚀对传输光束的调制作用并建立相应的衡量手段。

针对等离子体烧蚀对传输光束调制的特点,本文采用了功率谱密度^[13](PSD)曲线来表征其调制程度。结果表明,等离子体烧蚀引起的传输光束峰值强度对应于功率谱密度曲线中心峰值强度,而周期性起伏则体现于相应空间频率下的功率谱密度值。

2 相关理论及计算

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)经过多年的研究,提出将国家点火工程(NIF)元件表面起伏划分为3个不同的空间频率段分别进行评价^[14-15],依次为低频段($f < 0.03 \text{ mm}^{-1}$)、中频段($0.03 \text{ mm}^{-1} < f < 8.3 \text{ mm}^{-1}$)和高频段($f > 8.3 \text{ mm}^{-1}$),其中在中频区域以功率谱密度来表征。这里借用功率谱密度的概念描述光束的空间强度分布。

2.1 一维功率谱密度计算

采用经典的周期图法^[13,16]计算一维的功率谱密度。定义 $g(x)$ 为光强相对于空间坐标的函数,周期图法将函数 $g(x)$ 的傅里叶变换的模的平方除以采样长度得到的结果作为功率谱密度(PSD),功率谱密度 D_{psd} 的计算式为

$$D_{\text{psd}} = \frac{|G(v)|^2}{L}, \quad (1)$$

式中 L 为采样长度, $G(v)$ 为函数 $g(x)$ 经傅里叶变换后的频谱函数, $G(v) = F|g(x)| = \int_{-L/2}^{L/2} g(x)\exp(-i2\pi vx)dx$, v 为空间频率。

然而,实际数据的获取及计算机分析、处理都是以离散形式进行的,因此需将(1)式转化为离散形式,过程如下:

首先将函数 $g(x)$ 离散化。采样长度 L 表示为 $L = N\Delta x$, 其中 N 表示采样点数, Δx 为相邻采样点之间的间隔。根据采样定理知,只要满足 $\Delta x = 1/(2f_c)$ 这一最低要求 [f_c 为奈氏(Nyquist)采样频率], 离散化后获得的采样数据就能完全描述采样对象的所有信息。这样 $g(x)$ 可以表示为 $g(n)$, $G(v)$ 可以表示为 $G(m)$, 即

$$G(m) = \Delta x \hat{G}(m) = \Delta x \sum_{n=0}^{N-1} g(n)\exp(-j2\pi mn/N), \quad 0 \leq m \leq N. \quad (2)$$

由于 $g(n)$ 为实序列,根据傅里叶变换的对称性质, m 的取值范围为 $-N/2 \leq m \leq N/2$ 。(1)式中空间频率 v 被离散化为 $v_m = m/(N\Delta x)$, 而式中实际变化的是 m , 它与 v_m 一一对应。因此 $G(m)$ 和 $G(v)$ 是一致的,同理, $D_{\text{psd}}(m)$ 和 $D_{\text{psd}}(v_m)$ 也是一致的。因此,可以得到 D_{psd} 的离散计算公式

$$D_{\text{psd}}(m) = \frac{|g(v)|^2}{L} = \frac{|g(m)|^2}{N\Delta x}, \quad (3)$$

结合(1)式和(3)式可得一维的 D_{psd} 的计算公式:

$$D_{\text{psd}}(v_m) = \frac{\Delta x}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} g(n) \exp(-j2\pi mn/N) \right|^2, -N/2 \leq m \leq N/2. \quad (4)$$

显然,由(4)式计算出来的 D_{psd} 值是关于 v_m 对称的。在实际应用中,处于负频率处的 D_{psd} 是无意义的,因此通常 D_{psd} 曲线只绘制正频率部分。

2.2 二维功率谱密度计算

一维功率谱密度只能反映一个方向的起伏频率和强度,而全面反映波前起伏调制则需要计算其二维功率谱密度^[13,16]。类似一维功率谱密度,令 $g(x,y)$ 表示光强的空间分布函数,由经典的周期图法可以定义二维功率谱密度如下

$$D_{\text{psd}}(v_x, v_y) = \frac{|G(v_x, v_y)|^2}{L_x L_y}, \quad (5)$$

式中 L_x 和 L_y 分别为 x 轴和 y 轴方向长度, $G(v_x, v_y)$ 为已知函数 $g(x,y)$ 经傅里叶变换后的频谱函数,即:

$$G(v_x, v_y) = F[g(x,y)] = \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} g(x,y) \exp[-i2\pi(v_x x + v_y y)] dx dy, \quad v_x \text{ 和 } v_y \text{ 分别为 } x \text{ 轴和 } y \text{ 轴方向上的空间频率。}$$

对该频谱函数进行离散化处理,得到

$$G(v_l, v_k) = \Delta x \Delta y \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m,n) \exp[-i2\pi(lm/M + kn/N)], \quad (6)$$

式中 x 轴和 y 轴方向上的空间频率分别被离散化为 $v_l = l/(M\Delta x)$ 和 $v_k = k/(N\Delta y)$, 则用二维离散傅里叶变换得到二维功率谱密度的计算公式如下

$$D_{\text{psd}}(v_l, v_k) = \frac{|G(v_l, v_k)|^2}{L_x L_y}, \quad (7)$$

结合(6)式、(7)式,整理后得

$$D_{\text{psd}}(v_l, v_k) = \frac{\Delta x \Delta y}{MN} \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m,n) \exp[-2\pi(lm/M + kn/N)] \right|^2. \quad (8)$$

3 实验及功率谱密度计算

3.1 实验样品

通过电子束蒸发制备了实验样品。基底采用 $\phi 50$ 口径的石英腔片,高低折射率材料分别是二氧化铪(HfO_2)和二氧化硅(SiO_2),设计膜系为 S/L(HL)¹¹H4L/A,使用角度为 45° ,中心波长 1064 nm 处反射率达 99.5%。

3.2 实验过程及装置

实验分为两个阶段,首先通过激光预处理系统^[17]对样品表面部分区域进行光栅式扫描^[18],形成等离子体烧蚀区域。使用激光波长为 1064 nm,脉宽为 9 ns,激光入射角度 45° ,所用能量密度为 54.6 J/cm^2 。扫描面积为 2 cm^2 ,在样品表面位置如图 1 所示。

然后搭建了光束质量测试系统,分别记录测试光束经样品表面有等离子体烧蚀区域和未辐照区域反射

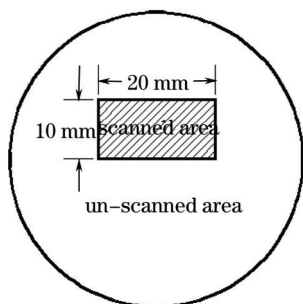


图 1 样品表面的等离子体烧蚀区域
Fig.1 Area of plasma scalds on the sample

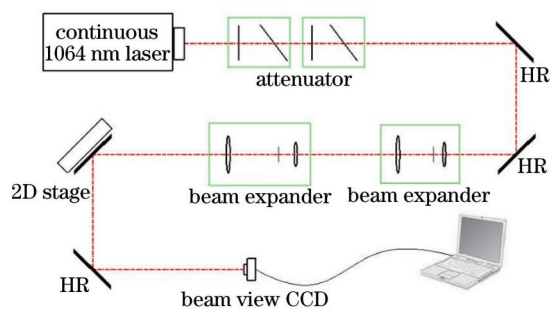


图 2 光束质量测量系统
Fig.2 Schematics of laser beam quality testing system

后的空间强度分布,并计算功率谱密度。图2为光束质量测量系统示意图,激光器输出波长为1064 nm的连续光束,经功率调节系统以及扩束、滤波系统后照射到样品表面。光强空间分布呈高斯型,有效光斑直径为5.7 mm。样品置于可两维移动样品台上。采用1024 pixel×1280 pixel的面阵电子耦合器件(CCD)记录光束横截面的空间强度分布。

3.3 实验结果及分析

图3给出了光学显微镜下的单个和多个等离子体烧蚀斑的形貌。从图3(a)可以看出中心存在小坑,外围带有波纹起伏结构,整体形状表现为椭圆形,为典型的等离子体烧蚀特征^[19]。单个烧蚀斑横向尺寸在500 μm左右。

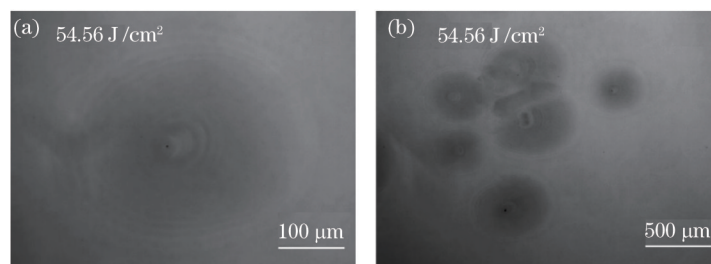


图3 等离子体烧蚀形貌。(a) 单个烧蚀斑;(b) 多个烧蚀斑

Fig.3 Morphology of plasma scalds under optical microscope. (a) Single spot of plasma scalds; (b) multiple spots of plasma scalds

移动样品,令光束辐照范围内只有一个烧蚀斑并将之置于光束中心,CCD在距离样品表面60 cm处记录反射光束强度空间分布如图4(a)所示,作为对比图4(b)给出了样品表面无等离子体烧蚀时的光强分布情况。

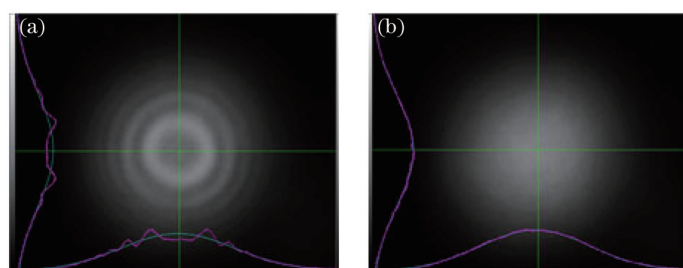


图4 样品反射后的光束强度分布。(a) 有等离子体烧蚀调制;(b) 未经等离子体烧蚀调制

Fig.4 Spatial intensity distribution of laser beam reflected by the samples. (a) With plasma scalds; (b) without plasma scalds

3.4 功率谱密度计算结果分析

首先计算了等离子体烧蚀调制光束的二维功率谱密度曲线,如图5所示,计算中以图片灰度值代表该处的光强。显然,二维功率谱密度具有圆对称性,因此只需分析一维情况即可获得其特性。

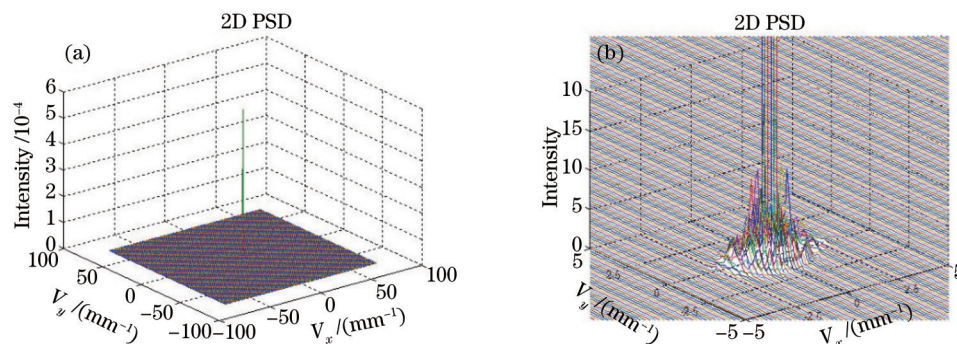


图5 二维功率谱密度图。(a) 整体特征;(b) 局部信息

Fig.5 Two-dimensional power spectral density. (a) Whole contour; (b) local information

图6给出了传输光束辐照区域内有、无等离子体烧蚀时的一维功率谱密度计算结果。对比两条曲线,共同点是空间频率接近零位置处的较强峰值。该峰值对应的横坐标数值都为0.07288 mm⁻¹,相应的空间周期为13.72 mm。分析发现该峰值对应的横坐标与光强记录器件的横向尺寸有关,而峰值强度取决于记录光斑

的峰值强度,光强越大则该值越大,反之亦然。在图4中可以看到,等离子体烧蚀的调制使得光束中心能量分散,从而使光斑中心位置处峰值强度有所降低,相应的烧蚀区域传输光束的功率谱密度曲线在该处的值减小。因此,该峰值可以作为光束传输过程中峰值强度变化的度量。

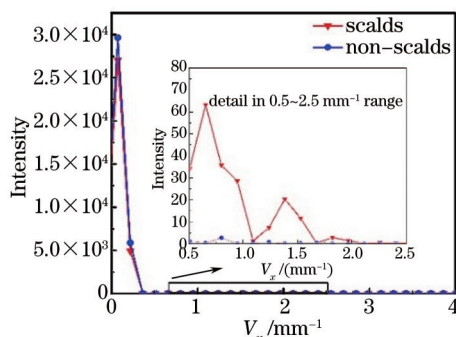


图6 一维功率谱密度比较

Fig.6 One-dimensional power spectral density

之后两条曲线近于重合,但对 $0.5\sim 2.5\text{ mm}^{-1}$ 频域内的曲线局部放大即可看出,该范围内出现了3个峰值,对应的空间频率依次为 0.65590 、 1.38468 、 1.82195 mm^{-1} 。分析等离子体烧蚀调制的情况,3个峰值依次为 63.293 、 20.428 、 2.883 ,比未调制光束均有大幅度提升。这说明,由于样品表面等离子体烧蚀的调制,传输光束的空间强度分布出现周期性起伏,而其功率谱密度曲线的峰值可表征其空间频率及起伏的剧烈程度。

结果表明,光束空间强度分布的功率谱密度曲线可完全体现光学元件表面等离子体烧蚀引起的传输光束空间强度分布的变化。需要说明的是,受限于实验条件,所用光斑尺寸有限并且空间分布呈高斯型,这在一定程度上影响了功率谱密度曲线与光强空间分布图之间的对应关系,但并不掩盖功率谱密度曲线作为表征光束调制手段的全面性与便利性。

4 结 论

采用经典的周期图法实现了光束空间强度分布的功率谱密度计算,建立了光束质量测试系统并分别记录了反射膜样品表面有、无等离子体烧蚀时传输光束的空间强度分布。计算两种情况下光束空间强度分布的功率谱密度发现,其中心峰值强度可体现等离子体烧蚀调制导致的光束峰值强度变化,不同频率对应功率谱密度可体现波前相位调制及其导致的光强空间周期性起伏强度。因此功率谱密度曲线可以作为表征等离子体烧蚀调制传输光束的手段。本文提出的方法不仅可作为量化描述等离子体烧蚀调制传输光束的手段,对于激光预处理的实际应用以及功能性损伤阈值的判断标准也具有重要意义。

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[C]. SPIE, 1993, 1782: 105-119.
- 2 Kozlowski M R, Thomas I M. Future-trends in optical coatings for high-power laser applications[C]. SPIE, 1994, 2262: 54-59.
- 3 Chang Yanhe, Jin Chunshui, Li Chun, *et al.*. Laser induced damage of fluoride coatings at 193 nm[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(7): 0707001.
常艳贺, 金春水, 李 春, 等. 193 nm 氟化物薄膜的激光诱导损伤[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0707001.
- 4 Wolfe C, Kozlowski M, Campbell J, *et al.*. Laser conditioning of optical thin films[C]. SPIE, 1989, 1438: 360-375.
- 5 Kozlowski M R, Wolfe C R, Staggs M C *et al.*. Large area laser conditioning of dielectric thin film mirrors[C]. SPIE, 1989, 1438: 376-392.
- 6 Yang Lihong, Wang Tao, Su Junhong, *et al.*. Influence of laser conditioning on the damage properties of HfO_2 thin film[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1231001.
杨利红, 王 涛, 苏俊宏, 等. 激光预处理对 HfO_2 薄膜损伤特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1231001.
- 7 Bercegol H. What is laser conditioning: A review focused on dielectric multilayers[C]. SPIE, 1998, 3578: 421-426.
- 8 Taniguchi J, LeBaron N E, Howe J, *et al.*. Functional damage threshold of Hafnia/Silica coating designs for the NIF laser[C]. SPIE,

- 2001, 4347: 109–117.
- 9 Genin F Y, Stolz C J, Kozlowski M R. Growth of laser-induced damage during repetitive illumination of HfO_2 - SiO_2 multilayer mirror and polarizer coatings[C]. SPIE, 1997, 2966: 273–282.
- 10 Liu X F, Zhao Y A, Li D W, *et al.*. Characteristics of plasma scalds in multilayer dielectric films[J]. Applied Optics, 2011, 50(21): 4226–4231.
- 11 Chen Weixiao, Li Dawei, Liu Xiaofeng, *et al.*. Influence of plasma scalds on laser-beam distortion for 1064nm high reflectivity laser film surface[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0331003.
陈惟肖, 李大伟, 刘晓凤, 等. 基频反射膜元件表面等离子体烧蚀对传输光束畸变的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0331003.
- 12 Schmidt J R, Runkel M J, Martin K E, *et al.*. Scattering-induced downstream beam modulation by plasma scalded mirrors[C]. SPIE, 2008, 6720: H7201.
- 13 Zhang R Z, Cai B W, Yang C L, *et al.*. Calculation of the power spectral density of the wavefront[C]. SPIE, 2000, 4231: 295–300.
- 14 Lawson J K, Wolfe C R, Manes K R, *et al.*. Specification of optical components using the power spectral density function[C]. SPIE, 1995, 2536: 38–50.
- 15 Lawson J, Aikens D, Wang D, *et al.*. Optical specifications—their role in the national ignition facility[J]. OSA Technical Digest, 2000: OMC2.
- 16 Lawson J K, Aikens D M, English Jr R E, *et al.*. Power spectral density specifications for high-power laser systems[C]. SPIE, 1996, 2775: 345–356.
- 17 Liu Xiaofeng, Li Dawei, Li Xiao, *et al.*. 1064 nm laser conditioning effect of $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ high reflectors deposited by E-beam[J]. Chinese J lasers, 2009, 36(6): 1545–1549.
刘晓凤, 李大伟, 李笑, 等. 电子束蒸发制备 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 高反膜的 1064 nm 激光预处理效应[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1545–1549.
- 18 Liu X, Li D, Zhao Y A, *et al.*. Automated damage diagnostic system for laser damage threshold tests[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(4): 407–410.
- 19 Liu X F, Zhao Y A, Gao Y Q, *et al.*. Investigations on the catastrophic damage in multilayer dielectric films[J]. Applied Optics, 2013, 52(10): 2194–2199.

栏目编辑: 张 雁