



基于损伤程度量化评估的光学薄膜元件激光损伤阈值测量方法

辛磊 杨忠明 孟君 刘兆军

Method for measuring laser damage threshold of optical thin film elements based on quantitative damage evaluation

Xin Lei, Yang Zhongming, Meng Jun, Liu Zhaojun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230614>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

缺陷诱导光学薄膜光场增强损伤分析

Analyses of light field enhancement damage induced by defects in optical thin films

红外与激光工程. 2021, 50(8): 20210357 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210357>

光学薄膜激光损伤阈值测量不确定度

Measurement uncertainty of laser-induced damage threshold of the optical thin films

红外与激光工程. 2017, 46(8): 806007 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0806007>

表面杂质和节瘤缺陷诱导薄膜元件热熔融损伤

Thermal melting damage of thin film components induced by surface impurities and nodule defects

红外与激光工程. 2018, 47(12): 1243003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1243003>

高反光表面三维形貌测量技术

Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces

红外与激光工程. 2020, 49(3): 0303006 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0303006>

飞秒激光作用下啁啾镀膜层内损伤相关动力学

Pre-damage dynamics of dielectric chirped mirror film layer excited by femtosecond laser

红外与激光工程. 2017, 46(11): 1106005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1106005>

光学元件激光损伤在线检测装置

An online laser-induced flaw inspection device for optical elements

红外与激光工程. 2018, 47(4): 417003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0417003>

基于损伤程度量化评估的光学薄膜元件激光损伤阈值测量方法

辛磊, 杨忠明*, 孟君, 刘兆军

(山东大学信息科学与工程学院, 山东青岛 266237)

摘要: 光学薄膜元件是高功率激光器中的关键器件, 其抗激光损伤的能力对整个激光系统的运行至关重要。精确测量薄膜元件激光诱导损伤阈值对提升激光器使用寿命与出光效率有着重要意义。提出一种新型激光损伤程度量化评估法, 该方法对薄膜元件在不同能量密度下的激光损伤程度量化分析, 通过损伤趋势拟合, 评估激光损伤阈值。对激光损伤区域的量化采用图像超分辨白光显微干涉测量法, 可实现纳米量级测量精度。通过仿真验证该测量方法可实现纳米量级损伤结构的三维重构, 重构损伤区域误差小于 0.01%。在实验部分, 以激光谐振腔镜及窗口片为测试样品, 无需大量重复性激光损伤实验, 基于单片样品在一组不同能量密度激光束照射下产生的单次损伤结果实现测量, 结果数据与 S-on-1 方法吻合, 偏差小于 0.5 J/cm², 两个样品多次测量结果的标准差分别为 0.361 J/cm² 和 0.064 J/cm²。

关键词: 光学薄膜元件; 激光诱导损伤; 损伤阈值测量; 白光干涉技术; 三维形貌测量

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230614

0 引言

自 1960 年第一台激光器问世以来, 激光凭借着其较好的单色性、方向性和相干性及高强度、高亮度的特点被广泛应用于各个领域, 深刻地影响了科学、技术、经济和社会的发展及变革。随着激光在加工、军事、通信等领域应用的深入发展, 人们对激光器的功率有进一步的要求, 高功率激光器应运而生。在高功率固体激光装置中, 强激光通过介质时产生非线性效应, 容易导致光学元件表面膜层损伤和内聚焦丝形成, 从而产生激光损伤^[1], 影响激光光束质量, 严重者甚至因为热效应使元器件炸裂, 损坏激光器。

光学元件的激光损伤机制非常复杂, 如多光子电离、雪崩电离、杂质、亚表面裂纹等^[2]。其中主要损伤原因是材料生产和加工过程中引入的杂质和结构缺陷^[3]。在光路系统中, 这些缺陷对光束造成不同程度的散射, 影响激光束均匀性^[4-5]。尤其在高功率激光装置中, 光束能量密度较高, 若光束的近场均匀性

差, 在终端光路会对其元器件造成极大的负担与风险, 危害系统的安全正常运行^[6-7]。为提高装置负载能力、降低运行成本, 研究强激光辐照下光学元件的损伤机制, 并根据损伤机制对材料生产和加工环节提出工艺要求是非常有必要的。而对激光器中的光学元件膜层损伤阈值的测量是提高元件加工质量, 优化镀膜工艺的关键。

对于激光诱导损伤阈值 (LIDT) 的测试方法, GB/T 16601^[8] 中有着具体的定义及方案, 通过相同激光束条件下多测试点冲击, 损伤点数与总测试点数比值得到的损伤概率作为判断依据, 制作光学元件激光损伤概率的统计曲线图, 并由损伤概率曲线通过线性拟合外推至零损伤概率处, 即为光学元件的激光损伤阈值。2013 年, 德国联邦材料研究和化验所的 Guido Mann 等^[9] 使用 ISO 11254^[10] 标准的 S-on-1 方法测试不同纤芯直径石英光纤样品, 探讨在纳秒脉冲激光下, 不同光斑尺寸与 LIDT 的关系, 通过热损伤模型解释了不同脉宽下的薄膜损伤机制; 美国科罗拉多州立

收稿日期: 2023-11-06; 修订日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62175131); 教育部联合基金项目 (8091B032125); 山东省重点研发项目 (2020CXGC010204)

作者简介: 辛磊, 男, 博士生, 主要从事光学系统设计、光学精密测量方面的研究。

导师简介: 刘兆军, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光物理与技术、非线性光学、激光工程及应用方面的研究。

通讯作者: 杨忠明, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学精密测量技术、光学系统设计方面的研究。

大学的 W.Rudolph, C.S.Menoni 等^[11] 研究在飞秒脉冲和纳秒脉冲激光下介质材料的损伤,通过标准电子密度模型,解释了不同脉宽下,薄膜损伤的机制和原理,并且证明 LIDT 随着脉宽的增大而增大;2015 年,法国阿基坦科学技术研究中心的 Martin Sozet 等^[12] 使用 1-on-1 和 S-on-1 两种方法测试亚皮秒脉冲激光对高反薄膜镜片的损伤阈值,但由于该方法仅仅只是基于损伤概率获取损伤阈值参数,因此还需要借助扫描电子显微镜 (SEM) 观察损伤区域的破损状况;2017 年,他又提出一种新的方法^[13],通过实时观测相同能量密度下不同激光脉冲次数造成的损伤区域面积变化,总结出两者的线性关系及增长系数。

文中提出一种基于损伤程度量化评估法 (QELDD) 的新型光学薄膜激光损伤阈值测量方法,通过对薄膜元件表面激光损伤区域三维测量,量化分析其损伤程度,并以该参数作为评判依据,对不同能量密度下薄膜元件表面的激光损伤程度进行拟合,由损伤趋势曲线确定损伤阈值。该方法根据实际测量的三维结果进行激光损伤情况分析,总结激光损伤规律,筛选有效测量数据,减少因杂质、结构缺陷等外部因素的干扰,有着较好的准确性及稳定性。

1 原理实验分析

1.1 LIDT 标准测量法

根据 GB/T 16601^[9] 中的规定,高斯分布的稳定激光束经过扩束系统、衰减系统以及聚焦系统后,传输

到被测样片表面,采用一定的激光作用方式对损伤阈值进行测试。目前用于对短脉冲激光的 LIDT 的标准测量方法主要有 1-on-1^[14] 和 S-on-1^[15] 两种方法。1-on-1 是单次激光辐照测试,在测试过程中,逐渐降低激光器输出的脉冲能量,从样品完全损伤到没有任何损伤点。每个脉冲能量采样多次,每个采样点辐照一次,每两个采样点间距恒定。依次记录各脉冲能量下有损伤的采样点所占总采样点的比例,即为该脉冲能量密度下的损伤概率。以激光能量密度为横轴,损伤概率为纵轴,得出损伤概率与激光能量密度的点分布,再用直线拟合并外推到零损伤概率,所对应的激光能量值即为该样品的 LIDT^[16] 值。S-on-1 是多次辐照测试,即对每个采样点处进行多次辐照,辐照次数为 S,除此之外的其他测试流程与 1-on-1 相同。图 1 为激光损伤测量系统示意图,激光器出射光束经由可调衰减器 AT1 调制后入射到分束器 BS1,其反射光被能量计 EM 接收用于激光能量监测,其透射光经由聚焦透镜 L 汇聚透过 BS2 后入射在待测薄膜样品表面,BS2 的反射光经过衰减器 AT2 调制后被 CCD 相机探测,经 BS2 分束后的透射光到待测样片的距离与反射光到 CCD 靶面的距离相同,均位于 L 透镜的焦点处,故 CCD 监测到的激光束光斑尺寸与辐照在样品表面的光斑一致,该尺寸用于配合 EM 计算辐照激光脉冲的能量密度。LD 光源用于增强激光辐照区域亮度,便于观测相机对激光损伤的判别及图像采集。图 1 右边是损伤区域的显微图。

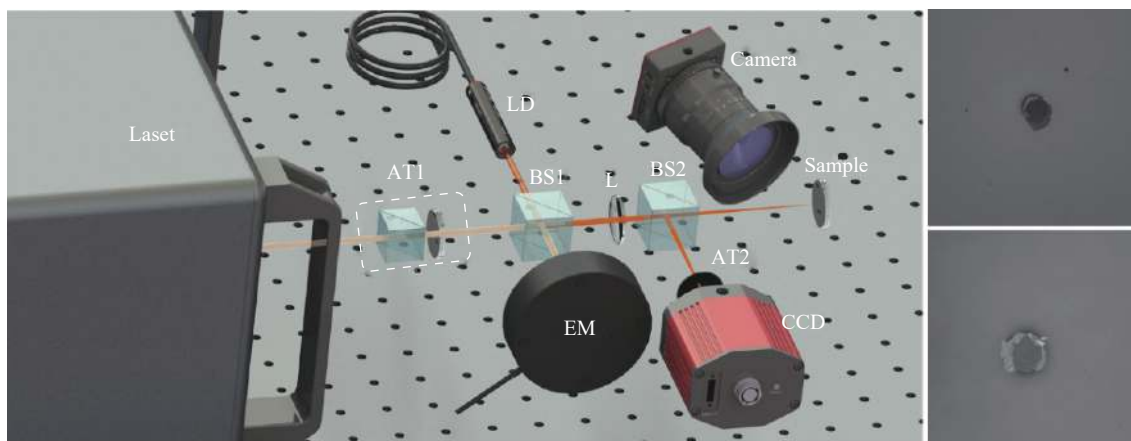


图 1 激光损伤测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser damage monitoring system

1.2 激光损伤程度量化评估法 (QELDD)

文中提出的 QELDD 方法测量损伤阈值, 是基于激光诱导损伤区域的量化, 建立损伤程度与激光能量密度之间的对应关系, 通过拟合方法评估损伤阈值。其中, 对激光损伤程度的量化是通过元件表面损伤区域的三维测量实现, 通过对不同能量密度下激光损伤情况多维度定量分析, 总结激光损伤规律, 筛选有效测量数据, 减少因杂质、结构缺陷等外部因素的干扰, 保证测量结果的准确性与稳定性。

该方法测量流程如图 2 所示。第一步, 通过激光损伤测量系统对待测样片进行激光损伤试验, 使样品表面出现激光损伤并记录造成不同损伤对应的激光能量密度; 第二步, 基于白光显微干涉测量系统对激光产生的不同损伤区域三维测量, 对损伤程度量化评估; 第三步, 结合损伤程度量化结果及对应激光能量密度构建激光损伤的离散点分布, 通过线性拟合出损伤趋势, 反推得到损伤阈值。

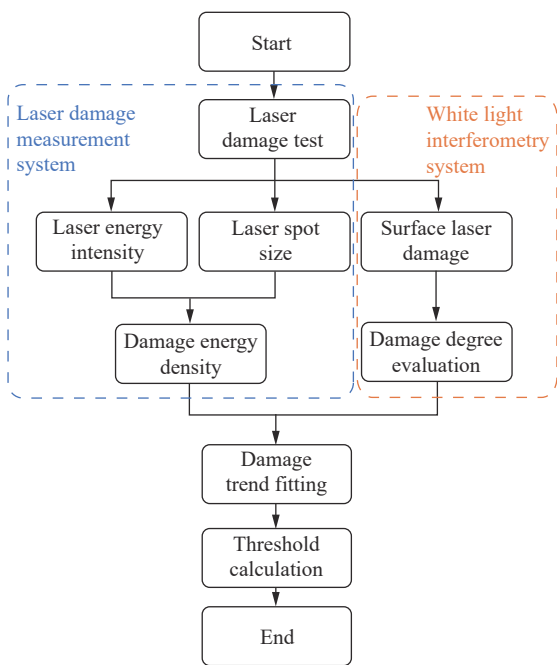


图 2 QELDD 方法流程图

Fig.2 QELDD method flow chart

1.2.1 激光损伤程度量化

在 QELDD 方法中, 量化激光辐照产生的损伤程度, 是评估 LIDT 值的关键环节, 需要严格保证测量精度及稳定性, 并且为防止测量过程对损伤区域产生额外影响, 量化方法还需要具有无接触测量的特点。该

方法最终采用白光显微干涉测量法^[17-18], 并在三维面形重构算法中结合超分辨处理, 实现对激光损伤程度纳米级精度的三维表征。

1) 白光显微干涉测量技术

白光显微干涉测量系统如图 3 所示, 白光光源经过平行光调制后入射到分束器 (BS) 上, 经分束器反射后进入干涉物镜 (IO), 经干涉物镜内的分光板后分为参考光与测量光, 移动样品位移台, 使参考光路与测量光路的光程差小于光源相干长度, 产生干涉图, 通过 PZT 位移器带动干涉物镜纵向扫描采样, CCD 采集不同光程差的干涉图, 提取出待测区域各像素处的干涉信号, 计算零光程差位置 (ZOPD), 获得高度信息, 构建待测样品的三维形貌。

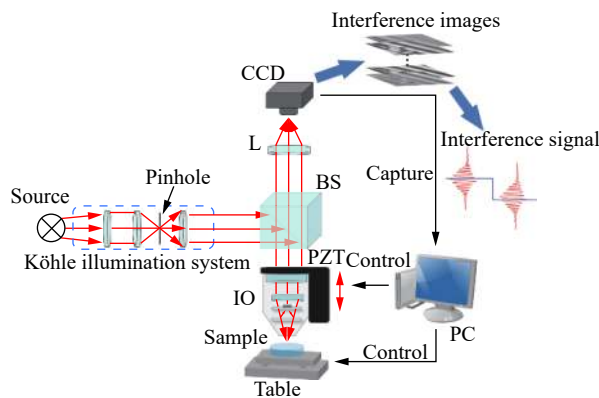


图 3 白光显微干涉测量系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the white-light interferometry system

在待测面上某像素点测量位置处的纵向扫描白光干涉信号的光强分布可表示为:

$$I(z) = I_{bg} \left\{ 1 + \gamma \exp \left[- \left(\frac{z - z_0 - h}{l_c} \right)^2 + \delta_0 \right] \cos \left(4p \frac{z - z_0 - h}{l_c} \right) \right\} \quad (1)$$

式中: I_{bg} 为背景光强, 是干涉光强的直流部分; $\gamma = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$ 为干涉条纹衬比度; $l_c = \frac{\lambda_c^2}{\Delta\lambda}$ 为光源的相干长度; λ_c 为中心波长; $\Delta\lambda$ 为带宽; z 表示 PZT 位移器驱动物镜的垂直扫描位置; z_0 表示两光束光程差为零时, 物镜所在的垂直位置 (即为零光程差位置); h 为该测量像素点处的高度值, 包含待测表面损伤程度信息; δ_0 为光路系统内初始相位差。

在得到单个像素单元处高度 (深度) 值后, 结合像素单元成像尺寸, 计算激光辐照产生的损伤体积, 即

为损伤程度的量化值。损伤体积计算公式如下：

$$V = \iint abh(x,y)dxdy \quad (2)$$

式中： a 与 b 为像素单元成像区域的长度与宽度值； (x,y) 表示待测区域上的像素位置坐标。

2) 图像超分辨算法

在对白光显微干涉图处理过程中, 对于干涉图进行超分辨处理可以进一步丰富干涉图中的细节信息, 提升激光损伤区域的测量精度。通过 Bicubic 插值法^[19], 对单个像素周围的 16 个像素加权平均得到像素点处的影响因子, 插入不同数量的像素点, 可以实现图像分辨率的提升。

双三次插值法利用 Bicubic 函数作为基函数^[20], Bicubic 函数的表达式如下：

$$W(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1, & |x| \leq 1 \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a, & 1 < |x| < 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $a = -0.5$ 。

插值处理过程如图 4 所示, 取原始图像中一像素点 p , 通过对 p 点周围 16 个整像素点的光强值进行加权平均计算得到对 p 点光强值的影响因子, 并且根据 16 个像素点到 p 点距离不同, 其权重也不同, 距离越近, 权重越大, 计算公式为：

$$I(p) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 I(G_{ij}) \times W(\mu_{ij}) W(\nu_{ij}) \quad (4)$$

式中： G_{ij} 为整数位置像素点； μ_{ij} 为 p 与 G_{ij} 的纵向距

离； ν_{ij} 为 p 与 G_{ij} 的横向距离； I 表示该点的光强值； W 表示 Bicubic 函数。图 3 中的 G_{00} 到 p 点的横向距离是 ν , 纵向距离是 μ , 其对于 p 的光强的权重是 $W(\mu)W(\nu)$, 以此类推, 计算不同像素处权重, 获得亚像素位置处光强值。

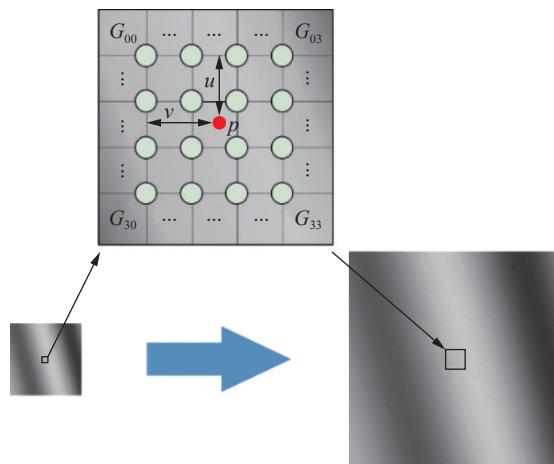


图 4 干涉图双三次插值

Fig.4 Bicubic interpolation of interferogram

1.2.2 激光损伤阈值评估

在完成激光损伤程度量化后, 结合对应的能量密度, 得到激光损伤的趋势分布。图 5 为在对 1064 nm 窗口片 (损伤阈值为 6.3 J/cm²) 损伤试验过程中, 不同能量密度激光辐照下产生不同程度损伤的三维测量结果, 从该图中可以看出该窗口片的损伤趋势。当处于临界损伤阈值时, 表面并未出现明显损伤, 但膜层

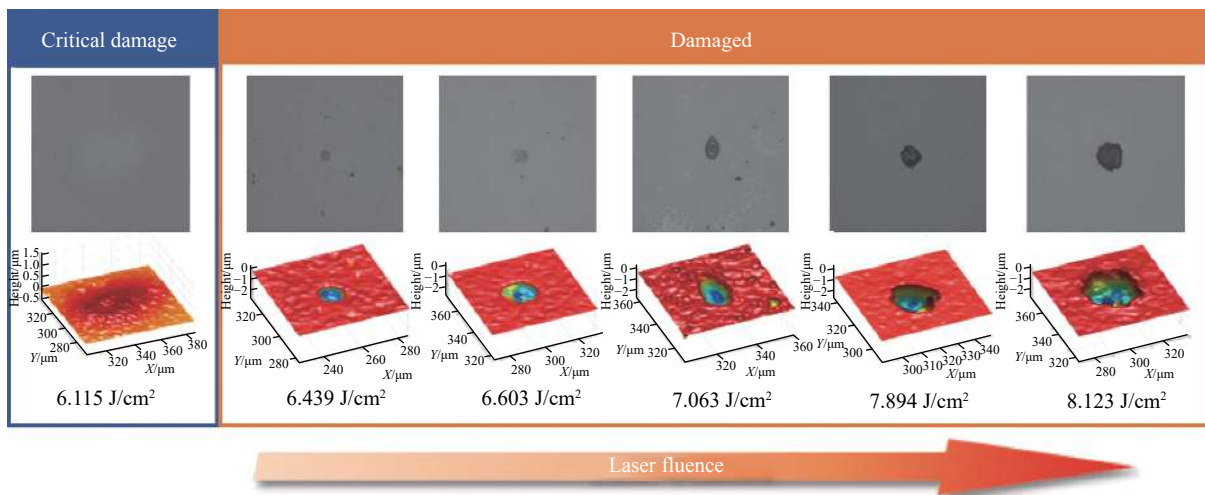


图 5 窗口片在不同能量密度下的激光损伤程度

Fig.5 Laser damage degree of window plate under different fluence

出现凸起现象,是膜层受到激光辐照产生的热应力产生的轻微形变,当激光脉冲能量进一步提升,能量密度超过膜层损伤阈值,表面出现损伤坑洞,随着能量密度的增加,损伤区域的面积与深度明显增大,损伤程度加剧。将在下文中得到激光损伤程度量化数据设为纵坐标,能量密度设为横坐标,可获得损伤程度对应能量密度分布图;再对损伤程度分布图中各点作线性拟合,拟合方法采用最小二乘法,该方法通过最小化实验偏移误差的平方和匹配最佳拟合参数。其拟合直线中的斜率和截距可由公式(5)的计算得到。得到拟合公式后,计算出与零损伤程度所对应的激光能量密度值即为激光诱导损伤阈值(LIDT)。

$$\begin{cases} k = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{\infty} (x_i - \bar{x})} \\ b = \bar{y} - k \cdot \bar{x} \end{cases} \quad (5)$$

式中: (x_i, y_i) 为离散坐标点, $i = 3, 4, 5 \dots$; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为横、纵坐标的平均值。

2 激光损伤三维测量仿真

为验证所提出的图像超分辨白光显微干涉测量

法,通过仿真元件表面激光损伤结构模型进行结果测试与分析。仿真模型是对一片镀有增透膜的窗口片在激光损伤试验中表面实际产生的激光损伤区域处理得到,对该窗口片损伤区域进行形貌测量,提取其三维空间分布信息,去除损伤边缘溅射杂质,只保留因激光冲击导致的坑陷区域结构,再进行滤波处理,获得损伤结构模型,该模型是从实际损伤结构中提取得到,具有激光冲击损伤代表性特征,可以有效地验证算法的三维重构效果。

具体的仿真流程如下:将激光损伤结构模型作为待测区域,使用图像超分辨白光显微干涉测量法对结构模型进行三维形貌重构,比较重构结果与仿真结构模型,验证所提出方法的测量精度。

仿真激光损伤结构三维模型如图 6(a) 所示,内部呈非均匀螺旋分布,存在较多细节结构分布,具有典型激光损伤结构特征。损伤区域纵向最大深度为 $3.6 \mu\text{m}$,横向尺寸为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,与实验室白光干涉测量系统相机分辨率相同。在模拟白光干涉测量过程中,设定白光光源的中心波长为 576 nm ,光谱带宽为 100 nm ,纵向扫描步长为 72 nm ,仿真激光损伤结构模型的干涉图如图 7 所示。

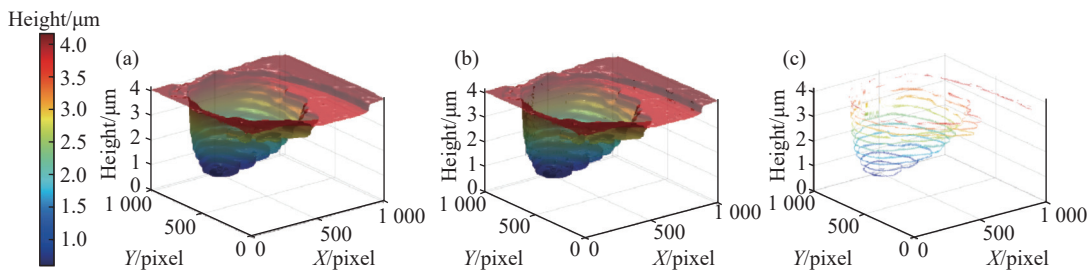


图 6 损伤模型的三维测量结果。(a) 仿真损伤模型; (b) 三维测量结果; (c) 结果残差

Fig.6 3D measurement results of damage model. (a) Simulation damage model; (b) Three-dimensional measurement result; (c) Residual

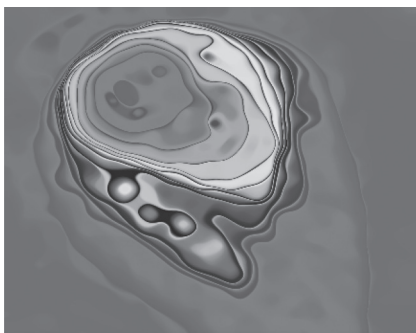


图 7 仿真模型干涉图

Fig.7 Interferogram of simulation model

仿真激光损伤结构模型的空间体积占比为 22.03% , 重构三维结果的空间体积占比为 22.02% , 二者相差约为 0.01% , 其最大纵向深度为 $3.598 \mu\text{m}$, 有效地还原出损伤结构的总体空间信息。重建三维结果与仿真结构的残差点云图如图 6(c) 所示, 残差集中出现在凹陷内部不规则凸起部分, 该部分由于细节信息较多, 存在细微的高度提取误差。对计算结果的残差偏移量进行量化, 将仿真模型图 6(a) 与测量结果图 6(b) 作

差, 偏差量空间分布如图 8(a) 所示, 其最大值为 $0.76 \mu\text{m}$, 平均值为 0.95 nm , 图 8(b) 是偏差量的统计直方图, 可以直观地看出偏差的分布区间集中在 $[-0.0098 \mu\text{m}, 0.0235 \mu\text{m}]$, 该部分占整个数据量的 99.35%, 即偏差

量主要集中在 $9.8\sim 23.5 \text{ nm}$ 这个区间, 重建残差及偏差在原始数据场中的占比定量地反映算法有着较好的精度。图 8(c) 是图 6(a) 与图 6(b) 在 $Y=512$ 时横截面对比结果, 两个曲线十分贴合。

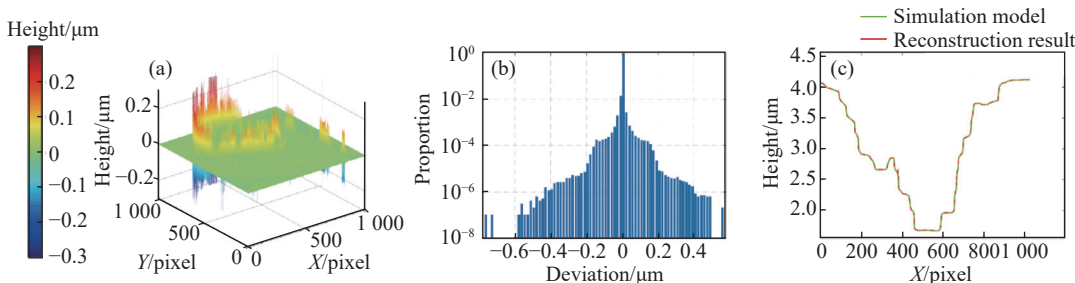


图 8 仿真结果分析。(a) 偏差空间分布图; (b) 偏差直方图; (c) 横截面对比

Fig.8 Analysis of simulation results. (a) Spatial distribution of deviation; (b) Deviation histograms; (c) Cross-sectional comparison

3 实验结果及分析

实验使用 1064 nm 激光谐振腔镜及窗口片作为测试样品, 基底均为直径 25.4 mm , 厚度 5 mm 的熔融石英玻璃片, 谐振腔镜镀有 1064 nm 波长增反膜, 窗口片镀有近红外多层增透膜。该两种类型样品均为激光实验中的常用空间调制光学元件, 具有激光元件的代表性与典型性, 用以验证文中方法的测量效果。

图 9(a) 是测量薄膜元件激光损伤系统, 实验用 1064 nm 激光器, 脉冲重复率为 100 Hz , 脉宽 20 ns , 最大输出能量为 580 mJ ; 衰减器 AT1 是由偏振分束器和半波片组成的, 通过旋转半波片进行能量强度调控; AT2 是由两个可调衰减片 (大恒光电, GCO-

0703 M) 组成, 避免在监测聚焦光斑尺寸时损坏 CCD 相机; 能量计 EM 是 Coherent 公司的 J-50MB-IR 能量计, CCD 相机是 Spiricon-OPHIR 公司的 SP620U-MIR 光束质量分析仪。图 9(b) 是实验室自研白光显微干涉测量系统, 光源是宽谱段 LED 光源, 中心波长 576 nm , 带宽 100 nm , 干涉图采集模块使用 IMPERX 公司的 GEV-B1410M-SC000 型号 CCD 相机, 分辨率为 $1360 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $6.45 \mu\text{m}$, 配备 10、20、100 倍干涉显微物镜, 平面内最高可以实现 $0.06 \mu\text{m}$ 单像素成像精度, 纵向扫描模块使用 PI 公司生产的 P-721, PIFOC 高精度物镜扫描仪, 扫描精度达到亚纳米量级。

在实验中, 笔者对激光器腔镜及窗口片进行单点

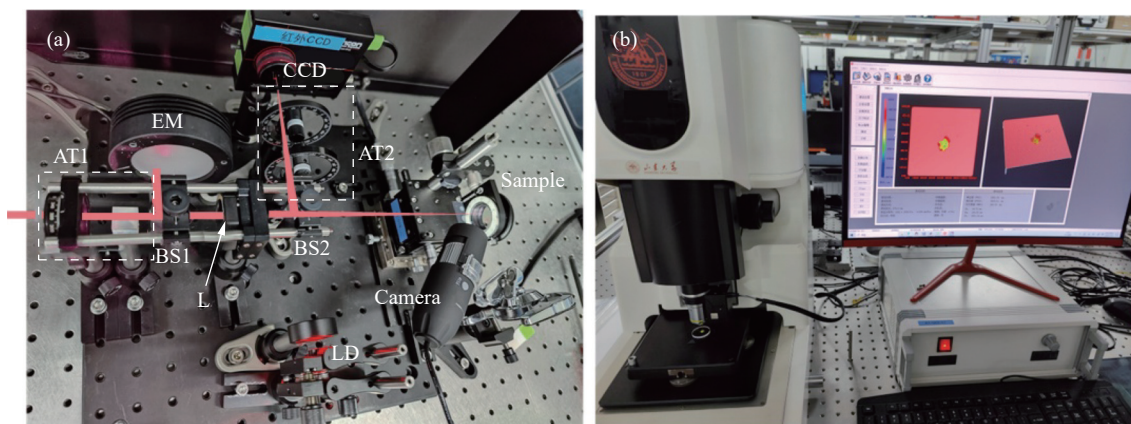


图 9 实验测量系统。(a) 激光损伤测量系统; (b) 白光显微干涉测量系统

Fig.9 Experimental measurement system. (a) Laser damage monitoring system; (b) White-light interferometry measurement system

多次激光辐照。为防止测试区域过近致使结果混淆,将每个样片按照钟表刻度划分为 12 个区域,分别对应不同的能量强度,在每个区域中选取一个位置作为测试点,对每个测试点进行 100 次激光辐照,让待测样片在激光不同能量密度下产生损伤。完成激光损伤操作后,使用算法优化的白光干涉法测量损伤区域,量化损伤程度,进行损伤趋势拟合。

腔镜及窗口片的 QELDD 测量结果分别如图 10(a)和图 11(a)所示。在图 10(a)中,腔镜样片 M1 的激光

损伤阈值结果为 5.10 J/cm^2 , M2 激光损伤阈值结果为 5.61 J/cm^2 , 标准差为 0.361 J/cm^2 ; 图 11(a)中,窗口片 W1 的激光损伤阈值结果为 6.62 J/cm^2 , W2 的激光损伤阈值结果为 6.53 J/cm^2 , 标准差为 0.064 J/cm^2 。两种样品的测量结果证明, QELDD 方法有着较好的稳定性,薄膜样品的激光损伤虽然会受到激光器稳定性、环境扰动、镀膜工艺及内部缺陷等因素影响,但 QELDD 方法可以有效地筛选明显偏差点,基于有效损伤点进行拟合,具有较高的稳定性及鲁棒性。

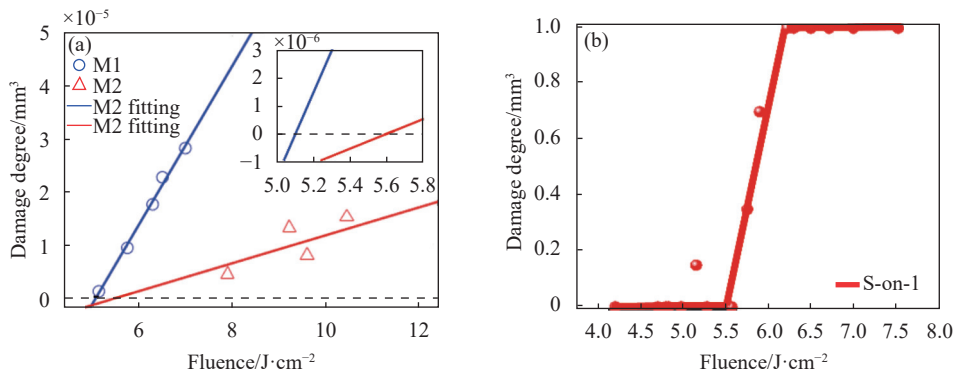


图 10 激光腔镜激光损伤阈值测量结果。(a) 激光损伤程度量化评估法; (b) S-on-1 法

Fig.10 Laser damage threshold measurement results of cavity mirrors. (a) QELDD method; (b) S-on-1 method

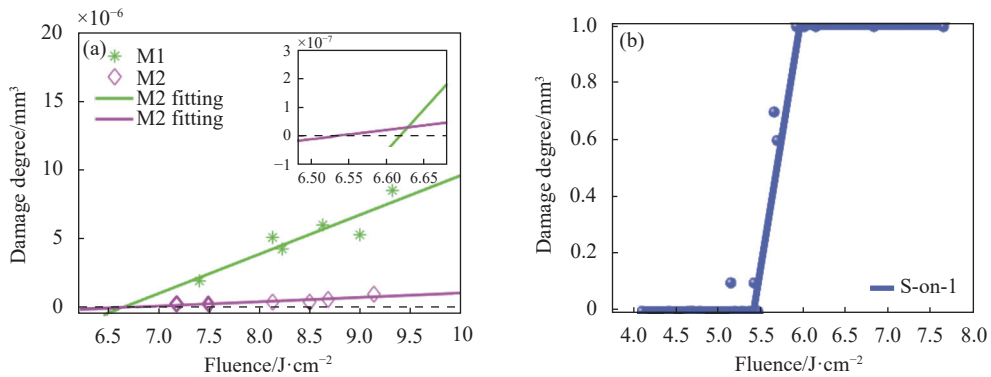


图 11 窗口片激光激光损伤阈值测量结果。(a) 激光损伤程度量化评估法; (b) S-on-1 法

Fig.11 Laser damage threshold measurement results of windows. (a) QELDD method; (b) S-on-1 method

为验证提出 QELDD 方法与国标测量结果是否一致,笔者用标准 S-on-1 方法测试样品, S 取 100 次。激光器腔镜测试结果如图 10(b)及表 1 所示,评估激光损伤阈值约为 5.53 J/cm^2 ; 窗口片测试结果见图 11(b)及表 2,评估激光损伤阈值约为 6.33 J/cm^2 。从结果上看, QELDD 法与 S-on-1 法测量结果相近,腔

镜的结果相差不超过 0.5 J/cm^2 , 窗口片的结果相差不超过 0.3 J/cm^2 , 有着较高一致性。值得注意的是,在损伤概率统计过程中,发现存在一些统计数据点是偏离估算结果的,即在激光损伤阈值范围之外出现损伤,在图 10(b)中,当激光能量密度为 5.155 J/cm^2 时,其损伤概率为 0.15, 出现损伤点,存在偏差;同理,

在图 11(b) 中, 能量密度为 5.887 J/cm^2 时, 损伤概率为 0.10, 同样存在偏差损伤点。这些存在除激光能量之外诱因导致的损伤是难以避免的, 如果不能有效剔除这些偏差数据, 将会在一定程度上影响 LIDT 的测量精度。

表 1 激光谐振腔镜损伤阈值测量结果

Tab.1 Damage threshold measurement results of laser resonator mirror

Method	Sample	LIDT / $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$
QELDD	M1	5.10
	M2	5.61
S-on-1	M3	5.53

表 2 窗口片损伤阈值测量结果

Tab.2 Damage threshold measurement results of window plate

Method	Sample	LIDT / $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$
QELDD	W1	6.62
	W2	6.53
S-on-1	W3	6.33

在上述两种方法的测试过程中, 方法 S-on-1 需要大量重复性实验, 操作较为繁琐, 测量结果精度难以保证, 在出现激光输出不稳定、样品镀膜不均匀、材质有缺陷等问题导致的误差损伤时, 损伤概率容易出现异常。在损伤概率从 0~1 跃变区域出现不定原因损伤时, 会导致阈值评估范围出现偏差, 为保证测试结果准确性及可靠性, 需要对新的样片重复实验, 增加工作量与测量时间。文中所提出 QELDD 方法基于元件损伤程度评估激光损伤阈值, 不需要大量重复性激光损伤实验, 任何激光损伤均可作为评估损伤阈值的重要参数, 并且在损伤区域三维测量过程中, 根据测量结果是否满足激光损伤特征进行判断, 剔除异常数据, 保留有效损伤点的数据拟合, 大大提升测量效率和降低成本。

4 结 论

文中提出一种基于损伤程度量化评估的新型光学薄膜激光损伤阈值测量方法, 通过图像超分辨白光

显微干涉测量法对激光损伤区域进行高精度三维表征及量化, 总结激光损伤结构特征, 该方法通过仿真验证相对误差小于 0.01%。然后基于激光损伤程度的量化参数, 拟合计算激光损伤阈值。实验搭建 1064 nm 激光损伤系统, 以激光谐振腔镜和窗口片作为样品进行测试, 两种样品结果标准差分别是 0.361 J/cm^2 和 0.064 J/cm^2 , 并将测量结果与 S-on-1 结果进行比较, 结果偏差不超过 0.5 J/cm^2 , 有着较好的稳定性及准确性。所提出的 QELDD 法在对激光损伤区域量化表征过程中, 基于损伤特征可以区分有效与无效损伤点, 避免无效损伤对结果拟合的影响, 有效地提升测量效率。该方法具有一般通用性, 不仅局限于 1064 nm 波段元件, 可以为多种波段光学元件的 LIDT 进行测量, 为 LIDT 测量提供一种新的思路, 有助于开展光学元件激光损伤机理研究, 为完善光学元件的制造生产工艺与镀膜加工工艺提供理论依据。

参考文献:

- [1] Feng B, Liu B G, Cheng F D, et al. Image processing technology for online detection of optical element damage [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1697. (in Chinese)
- [2] Qiu R. Study on optical element damage induced by high intensity laser[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2013. (in Chinese)
- [3] Yang L. Study on the effect of optical component surface contamination on load capacity[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [4] Fournier J, Grua P, Néauport J, et al. Temperature dependence of luminescence for different surface flaws in high purity silica glass [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(1): 1-10.
- [5] Demos S, Staggs M, Minoshima K, et al. Characterization of laser induced damage sites in optical components [J]. *Optics Express*, 2003, 10(25): 1444-1450.
- [6] Liao Z M, Raymond B, Gaylord J, et al. Damage modeling and statistical analysis of optics damage performance in MJ-class laser systems [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28845-28856.
- [7] Zhou L D, Su J Q, Zhang X M, et al. Effect of optical element "defects" on beam quality of boost amplifier stage [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(3): 326. (in Chinese)
- [8] Zhu Y N. Discussion of the measurement methods for laser induced damage threshold of optical coating [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 0532.

- [9] Mann G, Pentzien S, Krüger J. Beam diameter dependence of surface damage threshold of fused silica fibers and preforms for nanosecond laser treatment at 1064 nm wavelength [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 276: 312-316.
- [10] International Organization for Standardization. ISO 11254-2:2001 SNV[S]. The Swiss Association for Standardization, 2001. ical surfaces - Part2: S-on-I test [S]. Swiss: The Swiss Association for Standardization, 2001. https://www.intertekinform.com/en-AU/standards/iso-11254-2-2001-596043_saig_iso_iso_1365380/.
- [11] Rudolph W, Emmert L A, Rodriguez C, et al. Femtosecond to nanosecond laser damage in dielectric materials[C]//Pacific Rim Laser Damage 2013, Optical Materials for High Power Lasers, SPIE, 2013, 8786: 878602.
- [12] Sozet M, Néauport J, Lavastre E, et al. Laser damage density measurement of optical components in the sub-picosecond regime [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2091-2094.
- [13] Martin S, Stéphane B, Johann B, et al. Sub-picosecond laser damage growth on high reflective coatings for high power applications [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25767.
- [14] Riede W, Willamowski U, Dieckmann M, et al. Laser-induced damage measurements according to ISO/DIS 11254-1: Results of a national round robin experiment on Nd:YAG laser optics [C]//Proc SPIE, 1998, 3244: 1997.
- [15] Bingelyte V, Sirutkaitis V, Eckardt R C. S-on-I-induced damage thresholds of high-reflection metallic coatings at 1064 nm [C]//Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2002 and 7th International Workshop on Laser Beam and Optics Characterization, SPIE, 2003, 4932: 513-519.
- [16] Wu S, Shi W, Su J. Using an external electric field to reduce laser damage of DLC films [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2012, 45(1-4): 74-82.
- [17] Luo S, Sasaki O, Chen Z, et al. Exact surface profile measurement without subtracting dispersion phase through Fourier transform in a white-light scanning interferometer [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 894-899.
- [18] Zhang Y M, Jing W C, Zhang H X, et al. Computerized white light scanning interferometer and the application [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(6): 560-565.
- [19] Luu L, Wang Z, Vo M, et al. Accuracy enhancement of digital image correlation with B-spline interpolation [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3070-3072.
- [20] Gao S, Gruev V. Bilinear and bicubic interpolation methods for division of focal plane polarimeters [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26161-26173.

Method for measuring laser damage threshold of optical thin film elements based on quantitative damage evaluation

Xin Lei, Yang Zhongming*, Meng Jun, Liu Zhaojun

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China)

Abstract:

Objective Optical thin film components play a critical role in high-power lasers, and their ability to withstand laser-induced damage is crucial for the overall performance of the laser systems. Accurate measurement of the laser-induced damage threshold (LIDT) of thin film components is of great significance for improving the lifetime and output efficiency of lasers. However, the traditional test method for laser LIDT, based on the scheme outlined in GB/T 16601, involves evaluating the threshold value through damage probability, which requires numerous repetitive experiments and is both cumbersome and time-consuming. Moreover, the evaluation based on whether the damage occurs on the film surface introduces certain errors. The stability and reliability of the damage are influenced by factors such as laser stability, environmental disturbances, coating processes, and internal defects, which cannot be eliminated and affect the measurement results and accuracy. Additionally, probability statistics require testing many samples, resulting in high capital costs. Therefore, it is necessary to develop a fast and efficient method for measuring LIDT.

Methods In this paper a novel method of quantitative evaluation of laser-induced damage degree (QELDD) is presented, for quantitatively assessing the degree of laser-induced damage in thin film components. The method involves analyzing the quantification of laser-induced damage at different energy densities and evaluating the LID threshold (LIDT) through damage trend fitting. To accurately quantify the laser-damaged area, super-resolution white-light interferometric measurement is employed, which ensures nanoscale measurement accuracy. Simulation results demonstrate that the proposed method allows for the three-dimensional reconstruction of nanoscale damage defects with a reconstruction volume error of less than 0.01%. Experimental samples, including laser resonator mirrors and window plates, were measured using this method, without repeating the laser damage experiments. The results were found to be consistent with those obtained using the S-on-1 method, with a deviation not exceeding 0.5 J/cm^2 . The standard deviations of the measurement results were 0.361 J/cm^2 and 0.064 J/cm^2 , respectively.

Results and Discussions In the simulation results of the laser damage structure model on the surface of the test element, the optimization algorithm achieved a relative error of less than 0.01% for the three-dimensional measurement results (Fig.7). And the reconstruction deviation value is in nanometers order (Fig.8). In the experiment, samples of two laser components are used. The measurement results for the laser resonator mirror are shown (Fig.10, Tab.1). The standard deviation of multiple measurement results is 0.361 J/cm^2 , and the difference from the S-on-1 result is less than 0.5 J/cm^2 . Similarly, the measurement results for the window slice are shown (Fig.11, Tab.2). The standard deviation of the multiple measurement results is 0.064 J/cm^2 , and the difference from the S-on-1 result is less than 0.3 J/cm^2 . The proposed QELDD method is based on single irradiation results of a single sample with different energy densities, eliminating the need for repetitive testing on multiple samples. This ensures good stability and accuracy while maintaining efficiency.

Conclusions In this paper, a new laser damage threshold measurement method for optical films based on quantitative evaluation of the damage degree is proposed. The laser damage area is characterized and quantified with high precision using image super-resolution white light microscopic interferometry. The structural characteristics of the laser damage are also summarized. Based on the quantitative parameters of the laser damage degree, we fit and calculate the laser damage threshold. In the experimental setup, a 1064 nm laser damage system is utilized, and the laser resonator mirror and window plate are selected as samples for testing. The standard deviations of the two sample results are 0.361 J/cm^2 and 0.064 J/cm^2 , respectively. When compared with the results obtained using the S-on-1 method, the deviation of the measured results does not exceed 0.5 J/cm^2 , indicating good stability and accuracy of the proposed method. During the quantification and characterization of the laser damage area, the QELDD method effectively distinguishes between valid and invalid damage points based on the damage characteristics, thereby eliminating the influence of invalid damage on the result fitting, and improving measurement efficiency. This method introduces a new approach to LIDT measurement, facilitates further research on the laser damage mechanism of optical components, and provides a theoretical basis for enhancing the manufacturing and coating processes of optical components.

Key words: optical thin-film components; laser-induced damage; damage threshold measurement; white light interferometry; three-dimensional topography measurement

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (62175131); Ministry of Education Joint Fund (8091B032125); Shandong Province Key Research and Development Project (2020CXGC010204)