

激光损伤阈值自动测量装置及实验

陈超 杨斌 于东钰 阴万宏 宫经珠 李辉 王楠茜 杨科

Automatic measurement device of laser-induced damage threshold and its experiment

CHEN Chao, YANG Bin, YU Dongyu, YIN Wanhong, GONG Jingzhu, LI Hui, WANG Nanxi, YANG Ke

引用本文:

陈超, 杨斌, 于东钰, 等. 激光损伤阈值自动测量装置及实验[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 852–858. DOI: 10.5768/JAO202344.0403006

CHEN Chao, YANG Bin, YU Dongyu, et al. Automatic measurement device of laser-induced damage threshold and its experiment[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 852–858. DOI: 10.5768/JAO202344.0403006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

减反膜的梯度化与激光损伤阈值之间的关系研究

Relationship between gradient of antireflection film and laser induced damage threshold

应用光学. 2019, 40(1): 143–149 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107003>

一种基于旋转1/4波片法的激光偏振度测量仪

Laser polarimeter based on rotary 1/4 waveplate

应用光学. 2018, 39(6): 936–941 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607004>

416 nm纳秒脉冲激光对CCD损伤机理研究

Research on damage mechanism of 416 nm nanosecond pulsed laser to CCD

应用光学. 2021, 42(3): 534–541 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0307002>

亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性

Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers

应用光学. 2019, 40(1): 138–142 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107002>

静/动态刻蚀对熔石英表面质量和激光损伤的影响

Effect of static/dynamic etching on surface quality and laser-induced damage of fused silica

应用光学. 2017, 38(5): 837–843 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0507003>

可见光电视摄像机整机MTF测量装置及方法

Measurement device and method of MTF for visible TV camera

应用光学. 2020, 41(1): 134–139 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0103001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0852-07

激光损伤阈值自动测量装置及实验

陈 超, 杨 斌, 于东钰, 阴万宏, 宫经珠, 李 辉, 王楠茜, 杨 科

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 设计并搭建了一套 1 064 nm、532 nm 的双波长光学元件激光损伤阈值自动测量装置, 用于光学元件膜层激光损伤阈值的自动化检测。装置主要由脉冲激光光源、光束参数诊断组件、损伤在线诊断组件、待测件扫描运动平台和控制系统组成。整个测量装置和测量过程由基于 Labview 编制的计算机综合测量软件自动控制, 可实现损伤阈值在 $0.1 \text{ J/cm}^2 \sim 100 \text{ J/cm}^2$ 能量密度范围内的自动测量, 并利用该装置对 1 064 nm 增透膜和铝反射膜样品进行了测量, 得到损伤阈值分别为 27.09 J/cm^2 和 3.21 J/cm^2 , 相对不确定度分别为 3.91% 和 5.61%。

关键词: 自动测量; 激光损伤阈值; 1-on-1; 能量密度; 相对测量不确定度

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0403006

Automatic measurement device of laser-induced damage threshold and its experiment

CHEN Chao, YANG Bin, YU Dongyu, YIN Wanhong, GONG Jingzhu,
LI Hui, WANG Nanxi, YANG Ke

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: A set of 1 064 nm and 532 nm automatic measurement device of laser-induced damage threshold (LIDT) of dual-wavelength optical elements was designed and constructed for automatic detection of LIDT of optical elements film. The device was mainly composed of pulsed laser light source, beam parameter diagnosis component, damage online diagnosis component, scanning motion platform for parts to be tested and control system. The whole measuring device and measurement process were automatically controlled by the computer integrated measuring software based on Labview, which could realize the automatic measurement of damage threshold in the range of energy density from $0.1 \text{ J/cm}^2 \sim 100 \text{ J/cm}^2$, and the device was also used to measure the 1 064 nm antireflection film and aluminum reflection film samples. The results show that the damage thresholds are 27.09 J/cm^2 and 3.21 J/cm^2 , with a relative uncertainty of 3.91% and 5.61%, respectively.

Key words: automatic measurement; LIDT; 1-on-1; energy density; relative measurement uncertainty

引言

随着高能高功率激光器研制及其应用的不断发展, 光学元件损伤几率越来越高。激光损伤阈值是评价光学元件抗损伤能力的重要技术指标, 是影响高能高功率激光输出功率和能量水平的关键因素。脉冲激光导致的损伤通常是由于缺陷、膜层应力、表面污染物或者光吸收导致的热效应引起。在一定条件下, 光学元件损伤阈值测量与材料性能和激光参数, 特别是与激光波长、光斑尺寸

和脉冲宽度等有关, 影响测量结果的因素很多^[1-2]。

国际上对激光损伤阈值测量装置及其测量方法进行了大量研究^[3-8]。国内相关研究单位, 也参考 ISO 标准和国内外同行的研究成果, 研制了一系列激光损伤阈值测量装置^[9-14], 在激光损伤阈值的测量上进行了有益的探索。但总的来说, 研制的测量装置的工程化和标准化程度不高, 测量设备条件不同, 测试程序不统一, 人为因素、环境因素和器件因素造成测量值存在较大偏差, 测量数

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 技术基础项目 (JSJL2019208A004)

作者简介: 陈超 (1980—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光学计量测试技术研究。Email: cyrus8081@163.com

据的复现性和可比性比较差。

为了开展光学元件损伤特性及测试方法研究, 我们研制了一套 1 064 nm、532 nm 激光损伤测试装置, 该装置由计算机集成控制, 具有良好操作性和运行参数控制能力, 可实现 1-on-1、S-on-1、R-on-1 三种测试方法下的光学元件激光损伤测试。

1 激光损伤阈值测量方法

光学元件激光损伤阈值是指在激光损伤试验中, 统计分析得到的光学元件表面最大不损伤的激光能量密度或峰值功率密度值, 简称为零概率损伤阈值。目前国际上对于激光损伤阈值的测量, 基本遵循 ISO21254 标准的要求。同时为适应我国的技术条件, 在 ISO21254 标准基础上, 我国也制定了相应的 GB/T 16601-2017^[15]。上述标准中提出的光学元件脉冲激光损伤阈值测量方法有 3 种: 1-on-1、S-on-1 和 R-on-1。

1.1 1-on-1 测量方法

1) 采用不同能量密度的脉冲激光对样品进行辐照, 每个能量密度辐照一组测试点, 每组测试点一般不少于 10 个, 每个测试点只照射 1 次。测试点之间的距离至少是入射光斑直径的 4 倍, 以避免测试点之间的相互重叠的干扰。激光损伤探测判定系统得到不同能量密度下测试点的损伤几率。

2) 以能量密度为横坐标, 损伤几率为纵坐标, 对损伤几率-能量密度进行线型拟合, 拟合得到的直线与横坐标的交点处的能量密度就是零概率损伤阈值, 1-on-1 的测量原理如图 1 所示。

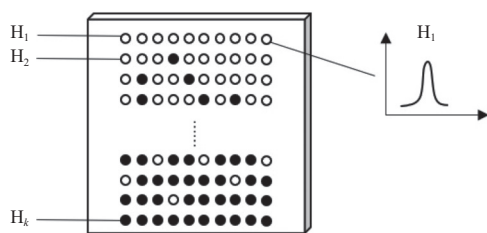


图 1 1-on-1 的测量方法

Fig. 1 1-on-1 measurement method

1.2 S-on-1 测量方法

1) 采用不同能量密度的脉冲激光对样品进行辐照, 每个能量密度辐照 1 组测试点, 每组测试点一般不少于 10 个, 每个测试点照射指定的脉冲数 (比如 1 000 次, 如果发生损伤则停止照射, 移至下一个测试点)。测试点之间的距离与 1-on-1 的规定相同。激光损伤探测判定系统得到不同能量密

度下测试点的损伤几率。

2) 和 1-on-1 测试方法相同, 拟合得到零概率损伤阈值, S-on-1 的测量原理如图 2 所示。

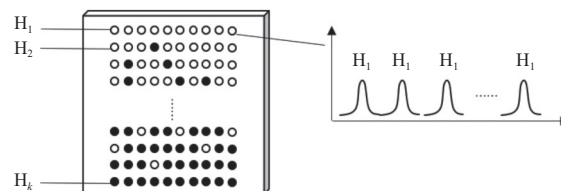


图 2 S-on-1 测量方法

Fig. 2 S-on-1 measurement method

1.3 R-on-1 测量方法

1) 采用不同能量密度的脉冲激光对样品进行辐照, 以能量密度递增的方式辐照 1 个测试点, 如果发现该测试点损伤, 移至下一个测试点。测试点之间的距离与 1-on-1 的规定相同。激光损伤探测判定系统得到不同能量密度下测试点的损伤几率。

2) 在数据处理时通常采用两种方法, 一种和 1-on-1 测试方法相同, 将数据点按照能量密度分类统计损伤概率后拟合得到零概率损伤阈值, 一种是计算每个位置刚损伤时的能量密度和前一个未损伤能量密度的平均值。第二种方法可得到较多的数据点, 实际工作中采用较多。该测量方法如图 3 所示。

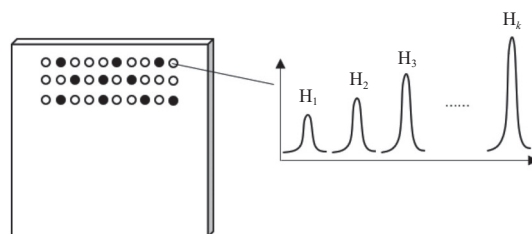


图 3 R-on-1 测量方法

Fig. 3 R-on-1 measurement method

2 激光损伤阈值自动测量装置

双波长光学元件激光损伤阈值自动测量装置, 原理及实物如图 4 和图 5 所示。该装置主要包括: 脉冲激光光源系统、激光光束诊断系统、激光损伤探测系统以及控制与处理系统组成。测试过程中, 将样品测试点放置于激光光路中, 计算机控制脉冲激光光源系统产生不同能量密度的脉冲激光, 使用不同能量密度或功率密度的单个激光脉冲对其进行辐照。对于每个选定的脉冲能量 (或功率) 至少选取 10 个测试点进行辐照并记录。使用

光束诊断系统记录下每个测试点实际使用的脉冲能量密度,同时记录下样品经激光辐照后的损伤情况(损伤或未损伤)。主控软件根据获得的辐照数据,构建一幅损伤概率随能量密度变化的关系图。损伤概率数据线性外推到零损伤概率即可得到损伤阈值。

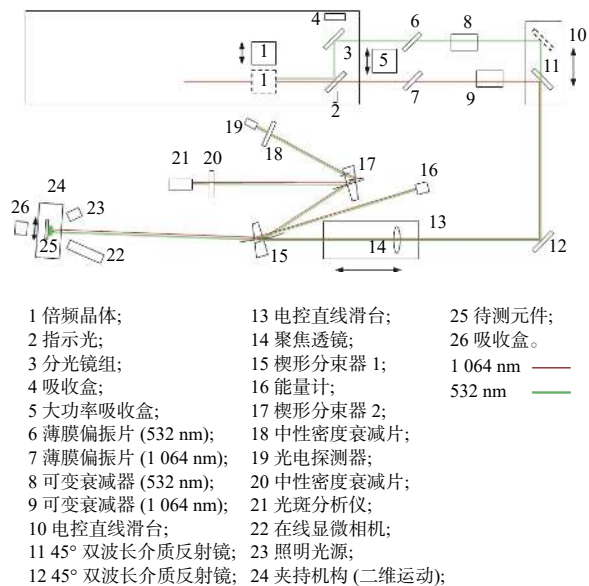


图4 双波长激光损伤阈值测试装置

Fig. 4 Schematic of dual-wavelength LIDT measuring device



图5 双波长激光损伤阈值测试装置

Fig. 5 Physical image of dual-wavelength LIDT measuring device

2.1 脉冲激光光源系统

激光器采用北京镭宝公司的泵浦 Nd:YAG 激光器,输出基频波长为 1.064 μm ,通过倍频晶体,输出 532 nm 波长激光。输出模式为 TEM₀₀,调 Q 后脉宽为 10 ns,最大脉冲能量为 2 J(1.064 μm),工作频率 1 Hz~10 Hz 可调。

损伤阈值测试中的可变衰减器大多采用偏振衰减的方式,由 1/2 波片和薄膜偏振片(或偏振分

光棱镜)组成,可变衰减器衰减范围可实现 0.1%~95%。损伤阈值测试中,通常要对激光能量实现大范围衰减,衰减范围要达到 10^3 量级,即最小透过率一般要小于 0.1%。因此,可变衰减器最小透过率大小对于衰减范围至关重要,主要影响因素有 3 个方面:1) 是入射激光偏振度;2) 是偏振器消光比;3) 是半波片位相延迟偏差。对于大能量激光器来说,存在热退偏效应,常常在激光器和可变衰减器之间增加了一个薄膜偏振片,增加激光的线偏振度。通过实验验证,本装置光源系统和可变衰减器组合后可在待测元件表面获得能量密度 0.1 J/cm²~100 J/cm² 的脉冲激光。

2.2 光束诊断系统

激光光束诊断系统由楔形分束镜、能量计、快速响应光电探测器、示波器、光斑空域分布测量系统等组成,以获得辐照脉冲激光的能量、光斑大小和脉宽,如图 6 所示。楔形分束镜 1 的分束比可以通过能量计进行测量。损伤阈值测量过程中,激光光束诊断系统的能量计测量得到的脉冲激光的能量值通过 USB 接口传输到数据采集和处理系统,计算机的主控软件将分束后的反射光的能量乘以分束比,就可以计算出辐照到待测样品测量点的脉冲激光能量。通过光路调校,光斑分析仪 CCD 靶面与样品的待测面对称共轭,在多路同步延时电路的控制下,光斑分析仪采集得到的脉冲激光光斑的大小就是辐照到待测样品测量点的光斑大小。时域分布测量系统由快速光电探测器和 1 G 带宽的示波器组成,可以满足 ns 级短脉冲激光脉宽精密测量的要求。

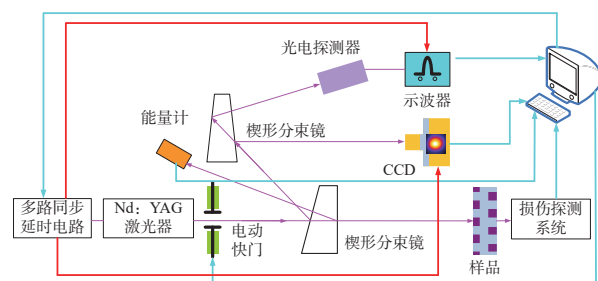


图6 光束诊断系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of laser beam diagnosis system

2.3 在线损伤探测系统

在线损伤探测方法主要有 2 种:1) 是散射光探测;2) 是在线显微成像。散射光探测可以直接探测测试激光的散射信号,也可以探测与测试激光叠加照射在测试点的另一独立激光束的散射信号。基于分离光源的散射光测量装置,需要一个

指向稳定性很高且强度波动很小的激光器作为辐射光源。在线显微成像方法可以在辐照过程中直接检查样品表面状态,通过比较辐照前后样品表面图像判断损伤,具有可靠性高、直观且适合自动测量的优点,在损伤阈值自动测试领域被广泛采用。本文中装置通过照明光源与在线显微相机结合进行损伤自动判断,如图 7 所示。

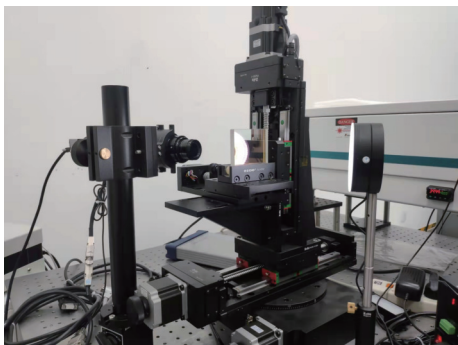


图 7 在线损伤探测系统

Fig. 7 Physical image of online damage detection system

2.4 控制与处理系统

控制与处理系统是损伤阈值自动测量装置的核心,由计算机和控制箱组成。计算机通过图 8 所示测试软件对激光器快门、可变衰减器衰减比例、待测元件夹持机构运动等进行控制,同时控制能量计、光斑分布测量相机、在线显微相机等测量组件的数据采集,并进行分析和计算处理。

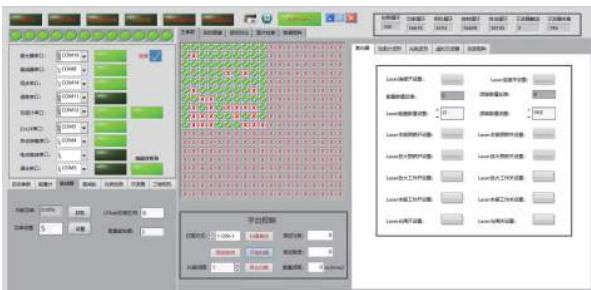


图 8 损伤阈值测试软件用户界面

Fig. 8 User interface of LIDT measurement software

由于短脉冲激光的脉宽只有 10 ns 左右,要准确捕获光斑分布和脉冲波形,需要保证激光器出光时间与触发光斑分布测量相机和示波器触发信号在时序上精确匹配。本装置中所采用激光器调 Q 信号与出光时间为 1 μs,光斑测量相机外触发信号与实际曝光之间延迟 43 μs,若采用调 Q 信号去触发光斑测量相机,则无法捕获到脉冲光信号,因此本装置通过自研的多路同步延迟电路同步触发激光器输出、光斑采集和脉冲波形的采集。

3 测量结果及分析

3.1 测量结果

实验样品基片为 K9 玻璃,单面镀制 1 064 nm 铝反射膜和增透膜,样品尺寸 50 mm×50 mm,入射角 3°,光束有效面积 0.001 cm²,有效脉冲宽度 9.5 ns,每个能量密度下辐照 20 个点,能量密度台阶数设为 15。激光器能量稳定性优于 1%,可变衰减器范围从 0.1%~97%。图 9(a) 为 1 064 nm 增透膜的损伤概率曲线,损伤阈值为 27.09 J/cm²,图 9(b) 为 1 064 nm 铝反射膜的损伤概率曲线,损伤阈值为 3.21 J/cm²。图 10 为测试过程中在线观测到的反射膜层的损伤形貌。如图 10 所示,铝反射膜损伤形貌主要表现为孔洞和膜层剥离,增透膜损伤主要集中在后表面,小孔洞聚集。

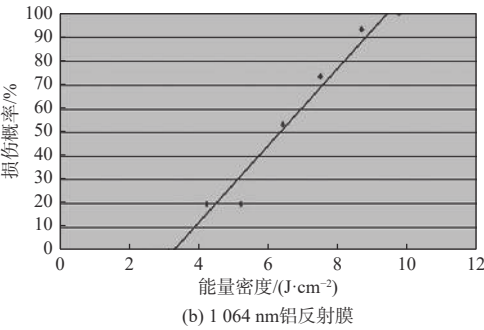
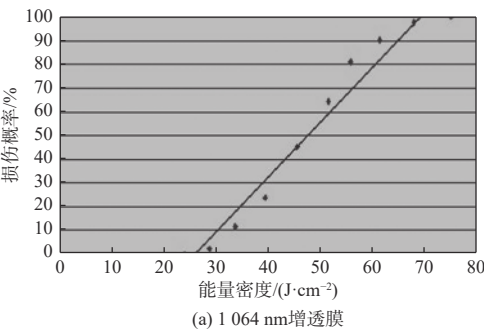
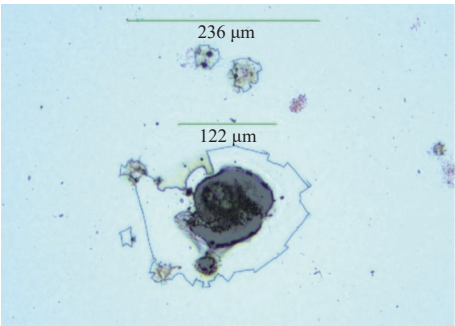
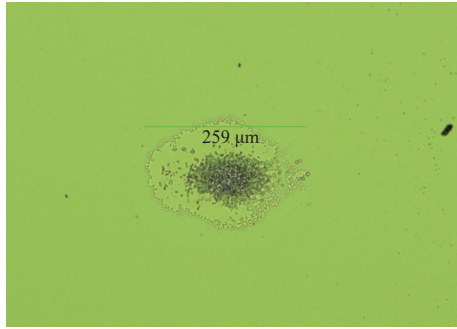


图 9 损伤几率图

Fig. 9 Curves of damage probability



(a) 1 064 nm 铝反射膜



(b) 1 064 nm 增透膜

图 10 1 064 nm 激光辐照下铝反射膜和增透膜损伤形貌

Fig. 10 Damage morphology of aluminum reflection films and antireflection films under 1 064 nm laser irradiation

采用 1 064 nm 和 532 nm 激光, 分别获得了 1-on-1、S-on-1、R-on-1 方式下对增透膜和铝反射膜零概率损伤阈值的测试结果, 如表 1 所示。

表 1 损伤阈值测量结果

Table 1 Measurement results of LIDT

波长/nm	样品名称	LIDT/(J/cm ²)		
		1 on 1	100 on 1	R on 1
1 064	铝反射膜	3.21	—	2.97
	增透膜	27.09	—	25.93
532	铝反射膜	0.56	—	0.32
	增透膜	6.42	4.55	6.38

3.2 测量结果不确定度分析

激光损伤阈值的测量结果受到能量密度测试过程的影响。同时, 用能量密度区间内有限次数测量的损伤几率代替平均能量密度处的损伤几率, 来确定能量密度的几率数据点的计算以及对这些点采用线性拟合的方式, 也影响到测量不确定度。根据 GBT 16601.2-2017 以及 ISO 21254-2 中测试结果评估流程, 对于每一个能量密度水平 H_i , 观测到的损伤概率 P_i , 由式(1)算出:

$$P_i = \frac{n_i^d}{n_i^d + n_i^{nd}} \quad (1)$$

式中: $n_i^d + n_i^{nd}$ 是产生 n_i^d 个测试点损伤而辐照的测试点总数。

用式(2)或式(3)估算数据集中每个损伤概率 P_i 的不确定度 σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{n_i^{nd}}{n_i^d (n_i^d + n_i^{nd})}} + \varepsilon_f^2, \quad \text{当 } n^d > 0 \quad (2)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\varepsilon_f^2}, \quad \text{当 } n^d = 0 \quad (3)$$

式中: ε_f 为所测能量密度的不确定度分量。能量密度由能量、分束比、光斑有效面积共同决定, 其不确定度分析结果如表 2 所示。

表 2 能量密度不确定度分析

Table 2 Uncertainty analysis of laser energy density

测量不确定度	激光能量密度/%
激光能量计测量相对不确定度(u_1)	1.25
分光比测量相对不确定度(u_2)	0.18
光斑有效面积测量 ^[16] (u_3)	1.1
能量密度计算相对合成不确定度(u_4)	1.67

获得不同能量密度 H_i 下的损伤概率 P_i 数据后, 对测量的损伤概率曲线进行线性拟合, 可以得到的斜率 m 和截距 b :

$$m = \frac{1}{\Delta} \left[\left(\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \right) \left(\sum_i \frac{P_i H_i}{\sigma_i^2} \right) - \left(\sum_i \frac{H_i}{\sigma_i^2} \right) \left(\sum_i \frac{P_i}{\sigma_i^2} \right) \right] \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{\Delta} \left[\left(\sum_i \frac{H_i^2}{\sigma_i^2} \right) \left(\sum_i \frac{P_i}{\sigma_i^2} \right) - \left(\sum_i \frac{H_i}{\sigma_i^2} \right) \left(\sum_i \frac{P_i H_i}{\sigma_i^2} \right) \right] \quad (5)$$

其中

$$\Delta = \left(\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} \right) \left(\sum_i \frac{H_i^2}{\sigma_i^2} \right) - \left(\sum_i \frac{H_i}{\sigma_i^2} \right)^2 \quad (6)$$

$$H_{th} = -\frac{b}{m} \quad (7)$$

同时利用最小二乘法通过式(4)和式(5)可得拟合线性方程 $P = mH + b$ 或者 $H = P/m - b/m$, 根据零概率损伤阈值定义, 用式(7)确定零概率损伤阈值 H_{th} 。以上节中 1 064 nm 波长下增透膜和铝反射膜的 1 on 1 测试结果为例, 计算前面图 9(a)增透膜损伤概率曲线对应的拟合方程为 $P = 0.022H_{th} - 0.596$, 损伤阈值 H_{th} 为 27.09 J/cm², 图 9(b)铝反射膜损伤概率曲线对应的拟合方程为 $P = 0.162H_{th} - 0.5197$, 损伤阈值 H_{th} 为 3.21 J/cm²。

根据标准不确定度的 A 类评定方法^[17], H 的标准不确定度为它的估计标准偏差, 同时根据标准偏差传递规律, 损伤阈值的不确定度 σ_{th} 为

$$\sigma_{th} = -\frac{1}{m^2} \sqrt{b^2 \sigma_m^2 + m^2 \sigma_b^2} \quad (8)$$

式中:

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{1}{\Delta} \sum_i \frac{H_i^2}{\sigma_i^2}} \quad (9)$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{\Delta} \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (10)$$

通过式(10), 上节中 1 064 nm 增透膜和铝反射

膜损伤阈值的不确定度 σ_{th} 分别为 1.06 J/cm^2 、 0.18 J/cm^2 , 相对不确定度分别为 3.91% 和 5.61%。不确定度大小主要与数据拟合直线的斜率大小以及数据拟合引起的标准偏差差异相关。由此可见, 光学元件激光损伤阈值测量过程中, 能量密度带来的不确定影响较小, 不确定度主要来源于损伤几率及损伤概率数据拟合带来的影响。若采用线性拟合, 数据拟合不确定度与光学材料损伤几率测量数据斜率及线性程度有很大关系。

4 结论

双波长激光损伤阈值自动测量装置通过计算机集成控制, 利用可变衰减器、同步控制电路和分束共轭方法对调 Q 脉冲激光(10 ns)不同能量密度光斑进行了准确捕捉、测量。装置测量程序自动化程度高, 可实现 1-on-1、r-on-1、s-on-1 三种方式的激光损伤阈值自动测量, 为开展光学元件的激光损伤研究提供良好的损伤实验平台。

参考文献:

- [1] 杨镜新, 庄亦飞, 沈卫星, 等. 激光光斑有效面积的准确测定[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(10): 1263-1266.
YANG Jingxin, ZHUANG Yifei, SHEN Weixing, et al. Precise measurement of the effective area of laser spot[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(10): 1263-1266.
- [2] 刘志超, 郑轶, 吴倩. 单发大口径光束下介质膜损伤阈值测试[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 052006-1-053006-6.
LIU Zhichao, ZHEN Yi, WU Qian, Single-shot large beam laser induced damage threshold measurement on dielectric coatings[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 052006-1-053006-6.
- [3] ALEXANDRU Z, LAURENTIU R, AUREL S, et al. Measuring the effective pulse duration of nanosecond and femtosecond laser pulses for laser-induced damage experiments[J]. Optical Engineering, 2013, 52(5): 054203-1-054203-10.
- [4] Technical Committee ISO/TC 172, Laser and laser-related equipment—Test methods for laser-induced damage threshold—Part1: Definitions and general principles ISO 21254-1: 2011[S]. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2011).
- [5] Technical Committee ISO/TC 172, Laser and laser-related equipment—Test methods for laser-induced damage threshold—Part2: Threshold determination ISO 21254-2: 2011 [S]. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2011).
- [6] MELNINKAITIS A, MIKSYS D, BALCIUNAS T, et al. Automated test station for laser-induced damage threshold measurements according to ISO 11254-2 standard[J]. SPIE, 2006, 6101: 61011J-1-61011J-10.
- [7] BINGELYTE V, SIRUTKAITIS V, ECKARDT R C. S on 1 induced damage thresholds of high-reflection metallic coatings at 1 064 nm[J]. SPIE, 2003, 4932: 513-519.
- [8] GALLAIS L, NATOLI J. Optimized metrology for laser-damage measurement: application to multiparameter study[J]. Applied Optics, 2003(42): 960-971.
- [9] 胡建平, 马平, 许乔. 光学元件的激光损伤阈值测量[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 187-191.
HU Jianping, MA Ping, XU Qiao. Laser damage threshold measurement of the optical elements[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 187-191.
- [10] 周刚, 马彬, 焦宏飞, 等. 1 064 nm高反射薄膜激光损伤阈值测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 963-968.
ZHOU Gang, MA Bin, JIAO Hongfei, et al. Laser damage threshold measurements of 1 064 nm high reflection mirrors[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 963-968.
- [11] 刘志超, 卫耀伟, 陈松林. ALD氧化铝单层膜1 064 nm激光损伤特性研究[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 373-376.
LIU Zhichao, WEI Yaowei, CHEN Shonglin, et al. Characterization of 1 064 nm laser induced damage in ALD optical film[J]. Journal of applied optics, 2011, 32(2): 373-376.
- [12] 胡建平. $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 光学薄膜激光损伤阈值的测量[J]. 光电子·激光, 2002, 13(4): 356-358.
HU Jianping. The measurement of laser damage threshold of hafnia/ silica multilayer coatings[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2002, 13(4): 356-358.
- [13] 李大伟, 赵元安, 贺洪波, 等. 光学元件激光损伤阈值的指数拟合法以及测试误差分析[J]. 中国激光, 2008, 35(2): 273-275.
LI Dawei, ZHAO Yuanan, HE Hongbo, et al. Exponential fitting of laser damage threshold and analysis of testing errors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 273-275.
- [14] 史亚莉, 陶显, 周信达, 等. 光学元件激光损伤在线检测

- 装置[J]. [红外与激光工程](#), 2018, 47(4): 0417003-1-0417003-7.
- SHI Yali, TAO Xian, ZHOU Xinda, et al. An online laser-induced flaw inspection device for optical elements[J]. [Infrared and Laser Engineering](#), 2018, 47(4): 0417003-1-0417003-7.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 激光器和激光相关设备 激光损伤阈值测试方法: GB/T 16601—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of People's Republic of China. Test method for laser damage threshold of lasers and laser-related equipment: GB/T16601—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [16] STRATAN A, ZORILA A, RUSEN L, et al. Measuring effective area of spots from pulsed laser beams[J]. [Optical Engineering](#), 2014, 53(12): 122513-1-122513-11.
- [17] 叶德培. 测量不确定度[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 19-20.
- YE Depei. Measurement uncertainty[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1996: 19-20.