

基于高斯脉冲激光空间分辨测量光学元件表面 激光损伤阈值研究

单翀^{1,2}, 赵元安², 张喜和¹, 胡国行², 王岳亮^{2,3}, 彭小聪^{2,3}, 李成^{2,3}

¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

² 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;

³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出一种基于高斯脉冲激光空间分辨测量光学元件表面激光损伤阈值的方法。通过设定激光能量密度差对高斯光斑进行能量密度分区, 统计并分析每个能量密度分区的能量密度以及损伤密度分布, 设定一个零损伤密度所对应的激光能量密度作为所测样品的激光损伤阈值。同时利用国际标准 1-on-1 激光损伤阈值测试方法对同一样品进行激光损伤阈值测试, 并将两种测试方法获得的损伤阈值进行了比较分析, 证明基于高斯脉冲激光空间分辨的激光损伤阈值测试方法, 解决了国际标准 1-on-1 激光损伤阈值测试中将高斯光斑内空间能量密度以及损伤点的不均匀分布等效地视作均匀分布所带来的问题。

关键词 测量; 激光损伤阈值; 空间分辨

中图分类号 TN244; O484

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0104002

Study on Laser Damage Threshold of Optical Element Surface Based on Gaussian Pulsed Laser Spatial Resolution

Shan Chong^{1,2}, Zhao Yuan'an², Zhang Xihe¹, Hu Guohang¹, Wang Yueliang^{2,3},
Peng Xiacong^{2,3}, Li Cheng^{2,3}

¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A method to measure the laser damage threshold of optical component surface based on Gaussian pulsed laser spatial resolution is proposed. The energy density partition is performed on the Gaussian spot by setting the laser energy density difference. By analyzing the energy distribution of the Gaussian pulse laser spot and the distribution of the damage point, a laser energy density with zero damage density is obtained as the laser damage threshold of the measured element. At the same time, the international standard 1-on-1 laser damage threshold test method will be used to measure the surface damage threshold at the same sample. And the damage thresholds obtained by the two methods are compared and analyzed. It is proved that the laser damage threshold method based on Gaussian pulsed laser spatial resolution is used to solve the problem that the energy density of the space in the Gaussian spot and the inhomogeneous distribution of the damage point are regarded as uniform distribution in the international standard 1-on-1 laser damage threshold test.

Key words measurement; laser damage threshold; spatial resolution

OCIS codes 120.4800; 140.3330; 140.3295

收稿日期: 2017-08-10; 收到修改稿日期: 2017-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(61405219)

作者简介: 单翀(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光损伤阈值测量方面的研究。E-mail: sichongShan@126.com

导师简介: 赵元安(1976—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从光学材料激光损伤方面的研究。

E-mail: yazhao@siom.ac.cn(通信联系人)

1 引言

随着激光器输出能量的不断提高,其对光学元件的抗激光损伤能力的要求也会随之提高。对于光学元件,精准的激光损伤阈值可以客观地表示光学元件的抗激光损伤能力^[1-7]。激光损伤阈值不仅为光学元件提供了安全的使用范围,并且在提高其抗损伤性研究中也起到至关重要的作用^[8-17]。对于光学元件的长脉冲激光损伤,其损伤机制为热过程。大多数激光损伤都是由光学元件中存在的缺陷引起的,这些缺陷诱导的缺陷损伤对应的激光损伤阈值要远远小于待测样品自身性质引起的本征损伤能量密度。例如在 Sc_2O_3 薄膜的激光损伤阈值测试中,由薄膜缺陷引发的缺陷损伤对应的激光损伤阈值要比 Sc_2O_3 自身性质引发本征损伤对应的激光损伤阈值小 10 倍^[18]。而在国际标准 1-on-1 激光损伤阈值测试中,是将高斯光斑内空间能量分布为高斯分布的高斯光斑面积,等效地看作为都以高斯峰值能量平均分布的有效面积,并且将高斯峰值能量除以有效面积获得的峰值能量密度作为所测样品的激光损伤密度^[19-22]。而在实际应用中,一方面光学元件中存在着种类繁多且分布不均匀的缺陷,这些缺陷都有着各自对应的激光损伤阈值;另一方面高斯脉冲激光能量在空间上是不均匀分布的,因此将未出现在激光峰值能量密度处的激光损伤点进行细化分析,是研究光学元件抗激光损伤能力的重要环节。

针对此类问题,国内外也已经有相应的研究。2011 年 Hu 等^[23]提出了基于激光辐照图像处理法实现单脉冲测量激光损伤阈值。其方法是运用二进制光栅对激光光束进行分束,通过计算机对激光辐照后的图像进行处理,获得每个激光分束所对应的激光能量密度,结合单脉冲激光辐照后样品的损伤情况,推导出其所测元件的激光损伤阈值。2016 年 Liu 等^[24]提出对样品激光辐照后的图像进行分析,统计并讨论辐照后损伤区域和未损伤区域的面积关系,利用图像灰度度分析的方法得到每个光斑分区的激光能量密度,从而实现单脉冲获得所测元件的激光损伤阈值。以上两种测试方法都采用计算机对激光辐照后图像的灰度度分析处理来得到激光能量密度,其中存在着一定的误差;运用单脉冲激光辐照的损伤情况来描述测试样品整体的抗激光损伤能量,同样存在着一定的异议。

针对上述问题,本文基于激光能量密度高斯分布理论,提出一种基于高斯脉冲激光空间分辨测量

光学元件激光损伤阈值的测试方法。同时利用此方法和 1-on-1 方法分别针对三种不同样品进行激光损伤阈值测试,分析并讨论两种方法的测试结果,证明本文提出的激光损伤阈值测试方法解决了 1-on-1 测试中激光损伤点未出现在激光峰值能量密度处、却以峰值能量密度作为激光损伤密度的问题。讨论了该测试方法中的变量因素对测试结果的影响,并根据测试方法建立缺陷分析模型,分析并讨论缺陷信息,证明基于高斯脉冲激光空间分辨测试方法的优势以及使用价值。

2 基于高斯激光空间分辨测量激光损伤阈值的原理及方法

2.1 测量原理

在 1-on-1 激光损伤阈值测试中,将高斯光斑中心峰值能量 H_{\max} 下降为 $1/e^2$ 时的光斑面积作为高斯光斑面积(其中 e 为自然对数的底数),将高斯光斑面积内的总激光能量 Q 都以高斯光斑峰值能量为基准进行等效均化,从而得到光斑有效面积 A_{eff} 为

$$A_{\text{eff}} = \frac{Q}{H_{\max}} = \frac{\pi\omega_0^2}{2}, \quad (1)$$

式中 ω_0 为高斯半径。随后将入射高斯峰值能量与靶面有效面积的比值,作为激光峰值能量密度 F_0 :

$$F_0 = \frac{H_{\max}}{A_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

若激光辐照后出现损伤,则将激光峰值能量密度 F_0 作为激光损伤密度^[25]。

但是在实际测试过程中,由于高斯光斑的能量分布为高斯分布,并且会有损伤点并未出现在峰值能量密度处的情况,此时就需要针对这些损伤点所对应的激光损伤密度进行准确分析,提出的基于高斯脉冲激光空间分辨测量激光损伤阈值法正是针对此类问题进行研究。

由于高斯脉冲激光光斑内的空间能量密度分布为高斯分布,因此在高斯光斑内的损伤点坐标能量密度可以表示为^[26]:

$$F_i = F_0 \times \exp\left(-\frac{2x_i^2}{\omega_x^2}\right) \exp\left(-\frac{2y_i^2}{\omega_y^2}\right), \quad (3)$$

式中 F_i 为每个损伤点对应的激光能量密度, F_0 为入射激光的激光峰值能量密度, x_i 、 y_i 为损伤点的横纵坐标, ω_x 、 ω_y 为高斯光斑横纵两个方向的高斯半径。

可以根据入射峰值能量密度设定一个激光能量密度差,对高斯光斑进行等能量密度差的光斑分区,

通过(3)式可以反推得到每个激光能量密度分区的面积 S_i 。统计激光多次辐照后每个能量密度分区出现的损伤点个数 N_i , 根据(4)式可以计算得到每个激光能量分区所对应的损伤密度 ρ_i :

$$\rho_i = N_i / S_i \quad (4)$$

最后通过讨论每个激光能量密度分区的损伤密度与能量密度的关系, 设定一个零损伤密度的激光能量密度作为所测样品的激光损伤阈值。

2.2 测量方法

所设计的基于高斯脉冲激光空间分辨测量激光损伤阈值的测试装置与 1-on-1 激光损伤阈值测试装置相同, 如图 1 所示。Nd:YAG 激光器产生的高斯激光, 经过由半波片和偏振片组成的衰减系统后, 由焦距为 5 m 的透镜聚焦到测试靶面, 入射角度为

45°, 偏振态为 S。在待测样品表面放置一个像素为 1920 pixel × 1078 pixel 的 CCD 相机来观察样品经过激光辐照后的激光损伤坐标情况。靶面能量大小由半波片和偏振片组成的衰减系统来调节。分光劈板分出的两束低能量激光, 一束由型号为 EPM2000 的能量探头收集, 用于对激光脉冲能量进行实时监控, 一束由光束质量分析仪(Laser Cam HR)的互补金属氧化物半导体(COMS)探头收集, 用于测量激光光斑的空间分布和光斑面积。测试所用激光参数: 波长为 532 nm, 脉宽为 7.6 ns, 靶面光斑有效面积为 0.26 mm²。

为了证明所提出的激光损伤阈值测试方法具有可重复性, 分别选取三种 45°、532 nm 的反射膜进行实验, 测试样品的材料与镀膜工艺如表 1 所示。

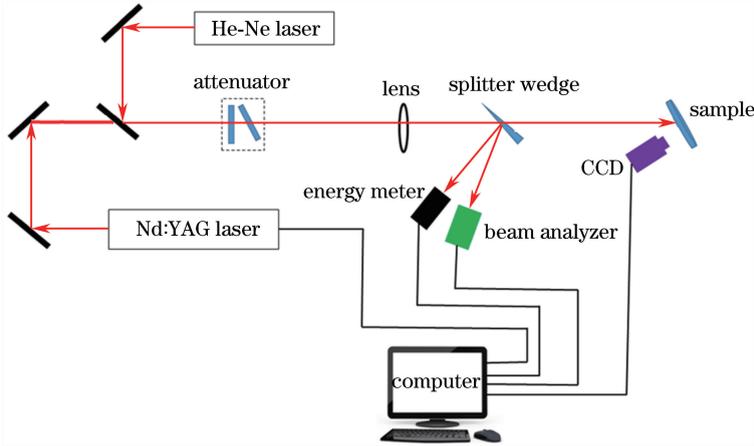


图 1 激光损伤阈值测试实验装置

Fig. 1 Experiment device for laser damage threshold test

表 1 测试样品

Table 1 Testing samples

Sample material	Deposition method	Coating stack	Polarization	Substrate
HfO ₂ /SiO ₂	Ion-beam sputtering	Substrate/4 L(HL)·11H4L/air (L:SiO ₂ , H:HfO ₂)	S	Φ50 mm K9 glass
Ta ₂ O ₅ /SiO ₂	Ion-beam sputtering	Substrate/(HL)·14H4.17L/air (H:Ta ₂ O ₅ , L:SiO ₂)	S	Φ50 mm K9 glass
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	Electron beam deposition	Substrate/4L(HL)·22H6.4L/air (L:SiO ₂ , H:Al ₂ O ₃)	S	Φ50 mm K9 glass

所提出的基于高斯脉冲激光空间分辨测量激光损伤阈值方法的核心是对高斯激光光斑内的损伤点分布情况与高斯激光空间能量分布情况的讨论, 因此需要先将光束质量分析仪中的光斑位置与 CCD 中的样品表面光斑位置对应起来。

研究利用由半波片和偏振片组成的衰减系统, 将 Nd:YAG 激光器发出的高斯激光能量衰减到极

低, 经过透镜聚焦到金属膜表面, 并用 CCD 相机记录靶面上激光光斑的轮廓。由分光劈板分出的一束激光由光束质量分析仪对其光斑面积以及能量空间分布进行实时记录。通过对比 CCD 的光斑轮廓图像与光束质量分析仪中的能量分布图, 以及对比两幅图中的光斑位置、轮廓以及特殊点, 利用放大、位移等方式, 将两幅图对应起来, 如图 2 所示。

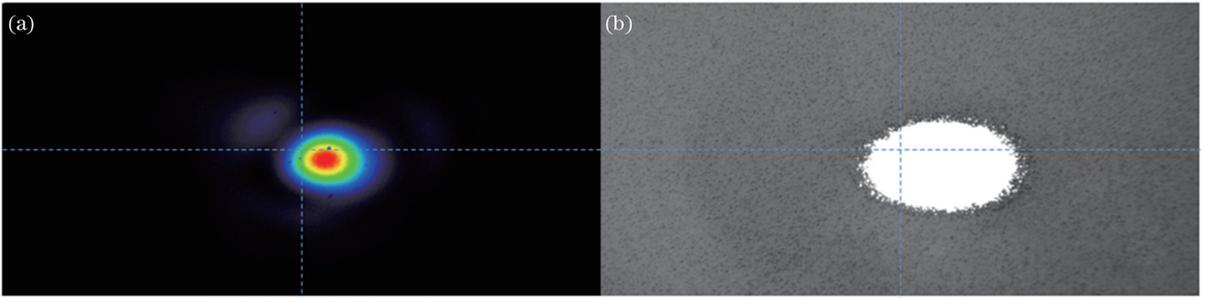


图 2 (a)光束质量分析仪光斑位置与(b) CCD 中光斑位置关系图

Fig. 2 Relationship between (a) spot position in beam quality analyzer and (b) spot position in CCD

由于实验时激光入射角度为 45° , 需通过投影建立高斯光斑内横、纵两个方向上的高斯半径关系。根据光束质量分析仪实时测量得到的高斯光斑有效面积为 0.26 mm^2 , 可以得到光斑高斯半径 w_x (横轴) 为 0.48 mm , w_y (纵轴) 为 0.34 mm 。

随后根据估测激光损伤阈值, 选取一个接近估测损伤阈值的激光能量密度, 对测试样品进行 100 次激光辐照, 记录并统计出每一次激光辐照后的损伤点坐标情况, 根据像素定位每个损伤点的坐标位置, 其辐照前后对比图如图 3 所示。

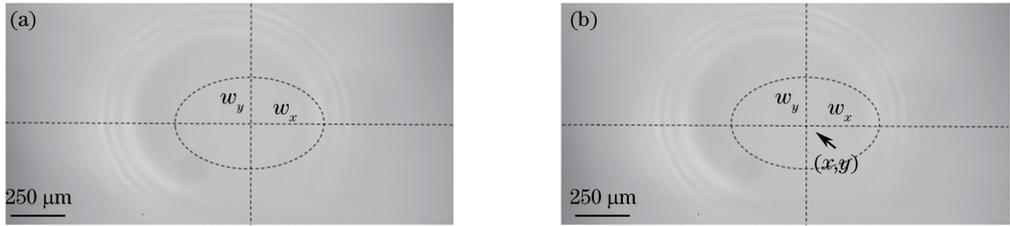


图 3 (a)高斯光斑位于 CCD 中的位置; (b)激光辐照后损伤点的坐标

Fig. 3 (a) Position of the Gaussian spot in CCD; (b) coordinates of the damage point after laser irradiation

根据统计 100 次高斯脉冲激光辐照后离散的损伤点坐标情况, 发现越接近高斯光斑中心的峰值能量密度处, 损伤点越密集。由于高斯脉冲激光光斑内空间能量分布为高斯分布, 因此根据上文所述理论模型, 可以根据损伤点坐标计算出每一个损伤点所对应的激光能量密度。

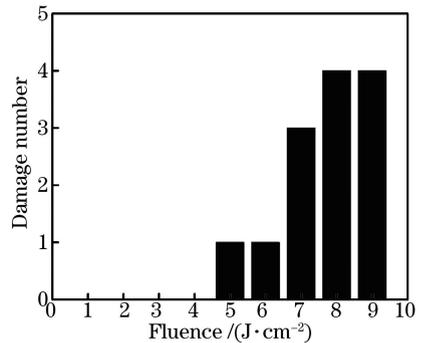


图 4 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 样品以 $10 \text{ J}/\text{cm}^2$ 的激光能量密度辐照 100 次后损伤点分布情况

Fig. 4 Distribution of damage points of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ sample irradiated at a laser energy density of $10 \text{ J}/\text{cm}^2$ for 100 times

随后对高斯脉冲激光光斑按照等能量密度差进行高斯光斑能量密度分区。以 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 样品为例, 激光有效面积为 0.26 mm^2 , 激光辐照峰值能量密度为 $10 \text{ J}/\text{cm}^2$, 以 $1 \text{ J}/\text{cm}^2$ 为能量密度差对高斯光斑进行能量密度分区, 即以等能量密度差将高斯光斑分成 10 个能量密度分区。根据 100 次激光辐照后激光损伤点分布情况, 可以统计得出每个光斑能量密度分区所对应的损伤点个数, 如图 4 所示。在实际应用中, 可根据具体要求选取能量密度差来完成对高斯光斑的能量密度分区。

高斯光斑能量密度分区所对应的能量密度与损伤密度的关系, 并设定所测样品中零损伤密度所对应的激光能量密度作为所测样品的激光损伤阈值。实验中, 由于激光能量输出的波动以及高斯光斑位置的抖动引起了 $10\% \sim 15\%$ 的误差。

最后根据每个光斑能量分区所对应的激光能量密度, 以及上文所述的测量原理计算可得每个能量密度分区的损伤密度。此时需要注意的是测试样品是经过 100 次激光辐照后得到的损伤点个数, 因此辐照面积 S_i 也同样需要乘以 100。通过讨论每个

运用所提出的高斯脉冲激光空间分辨测试方法测量样品的激光损伤阈值后, 再利用 1-on-1 激光损伤阈值测试方法对同一样品进行测试。为了便于对

比后讨论,将 1-on-1 激光损伤阈值测试方法中的激光能量台阶设置为 10 个,每个能量台阶激光辐照 10 次,以确保两种测试方法的激光辐照总次数均为 100 次。

3 结果与讨论

3.1 实验结果与分析

所测样品的 1-on-1 激光损伤阈值测试结果以及高斯脉冲激光空间分辨法测量激光损伤阈值中激光能量密度的选取和实验结果如表 2 和图 5 所示。

表 2 实验结果

Table 2 Experimental results $J \cdot cm^{-2}$

Test sample	1-on-1 method	Selection of laser fluence with spatial resolution method	Spatial resolution method
HfO ₂ /SiO ₂	9	8	2
Ta ₂ O ₅ /SiO ₂	11.7	11	6
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	9	10	4

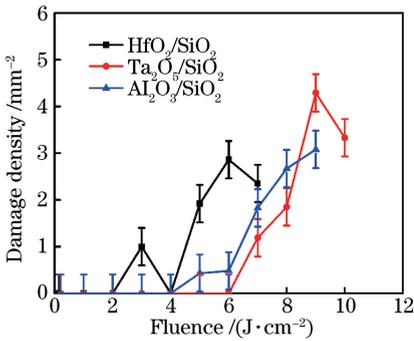


图 5 高斯空间分辨法测量激光损伤阈值实验结果

Fig. 5 Experimental results of laser damage thresholds measured by Gaussian spatial resolution method

由实验结果可看出,所提出的基于高斯脉冲激光空间分辨测量得到的激光损伤阈值要比 1-on-1 激光损伤阈值测试法得到的激光损伤阈值低。原因在于 1-on-1 激光损伤阈值测试方法是将能量分布为高斯分布的高斯光斑以峰值能量为基准等效为有效光斑,并将峰值能量与有效光斑的比值作为峰值能量密度,并当作测试样品的损伤能量密度。而实际上,高斯光斑空间能量分布以及激光损伤点的分布都不是均匀分布的,正是在 1-on-1 的基础上,针对损伤点未出现在激光峰值能量密度处的情况,对损伤点的激光能量密度进行细分研究,因此实验所得损伤阈值比 1-on-1 测试方法得到的结果要小。

3.2 高斯激光入射能量密度的取值对实验结果的影响

在基于高斯脉冲激光空间分辨法测量光学元件

表面激光损伤阈值的研究中,高斯脉冲激光能量密度的选取是影响实验结果的重要因素。因此,以 Al₂O₃/SiO₂ 样品为例,分别选取激光能量密度为 8,10,15,20,25 J/cm² 进行激光辐照测试,从而完成对比实验。实验结果如图 6 所示。

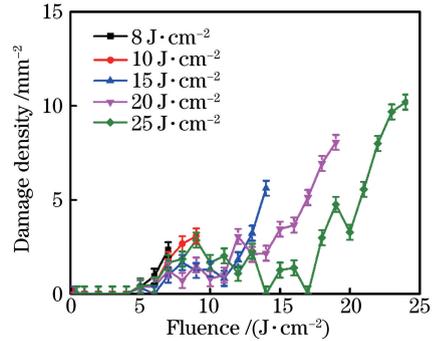


图 6 激光辐照能量密度的选取对实验结果的影响

Fig. 6 Effect of laser irradiation energy density selection on experimental results

由对比实验可知,随着能量密度的提高,最大损伤能量密度始终为 4 J/cm²,并不会随之变化。原因在于样品中存在的缺陷种类都有着其对应的激光损伤阈值。并且,当激光辐照能量密度高于其缺陷损伤阈值时,便会诱发其缺陷损伤。因此对于缺陷损伤阈值最低的缺陷种类,其损伤都会出现在一个固定的激光能量密度浮动范围内,并不会随着激光辐照能量密度的变化而变化。

3.3 基于空间分辨法对于缺陷特性的分析

纳秒激光辐照产生的破坏与样品的缺陷种类以及缺陷密度紧密相关,由于各类缺陷都各自具有尺寸以及吸收能力等不同特性,因此对于样品中存在的缺陷种类进行区分与讨论,是研究光学元件抗激光损伤能力的重要组成部分。研究根据法国菲涅耳实验室的 Krol 等^[27-28]提出的假设缺陷阈值服从高斯分布的统计模型,结合 1-on-1 与基于高斯激光空间分辨法这两种激光损伤阈值测试方法,得到了所测样品中缺陷密度以及缺陷阈值的分布情况,并讨论了这两种测量方法所得到的缺陷信息。

此模型假设每个缺陷都有其对应的阈值 T ,缺陷随阈值的系统分布为 $g(T)$, $g(T)$ 给出了能量密度在 $T \sim T + \Delta T$ 之间单位面积内的缺陷数。

$$g(T) = \frac{2d}{\Delta T \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{T - T_0}{\Delta T/2} \right)^2 \right], \quad (5)$$

$$d = \int_0^{\infty} g(T) dT, \quad (6)$$

式中 T_0 为平均阈值, ΔT 为阈值标准差($1/e^2$ 下全宽度), d 为缺陷密度。

在提出的基于高斯脉冲激光空间分辨法测量激光损伤阈值应用中,仅有若干离散的损伤密度,因此对能量密度分区的单位面积损伤点进行积分计算,结果即为每个能量密度分区的损伤密度。可采用拟合的方法来确定缺陷信息:缺陷密度 d_i , 缺陷损伤阈值平均值 T_i 和其阈值标准偏差 ΔT_i 。同样以 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 样品为例,为了与 1-on-1 实验数据个数以及拟合参数一致,入射激光能量密度选取为 10 J/cm^2 , 由于光斑能量密度分区是根据设

定的 1 J/cm^2 为能量密度差进行划分的,因此需将 (6) 式中的积分上下限设定为能量密度差进行拟合:

$$d_i = \int_{i-1}^i g(T) dT. \quad (7)$$

实验拟合结果如图 7 所示。分析高斯脉冲激光空间分辨法测试结果,拟合得到一种缺陷,缺陷信息为 $d = 0.51 \text{ mm}^{-2}$ 、 $T_0 = 5.044 \text{ J/cm}^2$ 、 $\Delta T = 0.22 \text{ J/cm}^2$ 。

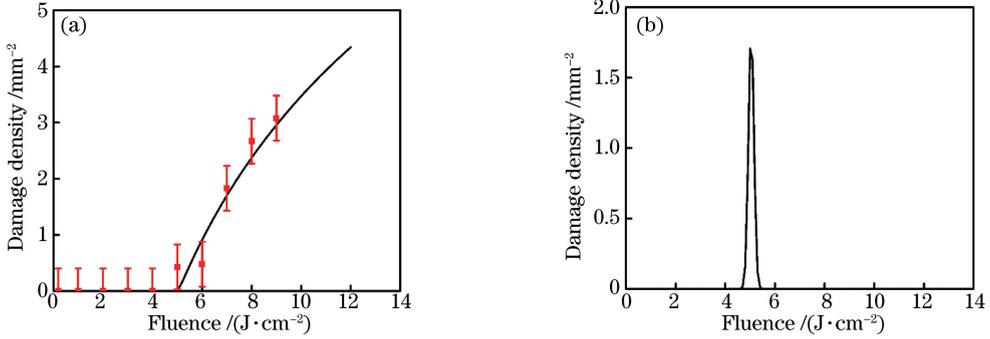


图 7 (a) 基于高斯激光空间分辨测量并拟合的损伤密度曲线; (b) 基于高斯分布的统计模型拟合的缺陷信息

Fig. 7 (a) Damage density curve based on Gaussian laser spatially resolved measurement; (b) defect information of statistical model fitting based on Gaussian distribution

在 1-on-1 激光损伤阈值测试应用中,仅有若干离散的损伤概率值,因此运用此缺陷分析模型与泊松分布模型相结合,同样可以判断得到缺陷信息。

内,能够诱发损伤的缺陷数目。最后,损伤概率 $P(F)$ 可以用泊松公式来表示:

$$P(F) = 1 - \exp[1 - N(F)]. \quad (10)$$

若 $S_{\text{eff}} = \pi\omega_x \times \omega_y / 2$ 为等效光斑面积,用 $S_T(F)$ 表示激光能量密度 $F > T$ 时相应的光斑面积,则:

$$S_T(F) = S_{\text{eff}} \ln(F/T), \quad (8)$$

$$N(F) = \int_0^F g(T) S_T(F) dT, \quad (9)$$

同样以 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 样品为例,1-on-1 测试与缺陷分析结果如图 8 所示。根据 1-on-1 测试结果分析拟合得到两种缺陷,第一种缺陷为 $d_1 = 0.49 \text{ mm}^{-2}$ 、 $T_{01} = 6.66 \text{ J/cm}^2$ 、 $\Delta T_1 = 0.23 \text{ J/cm}^2$, 第二种缺陷为 $d_2 = 3.77 \text{ mm}^{-2}$ 、 $T_{02} = 26.80 \text{ J/cm}^2$ 、 $\Delta T_2 = 0.2 \text{ J/cm}^2$ 。

式中 $N(F)$ 为 F 大于缺陷阈值 T 的有效光斑面积

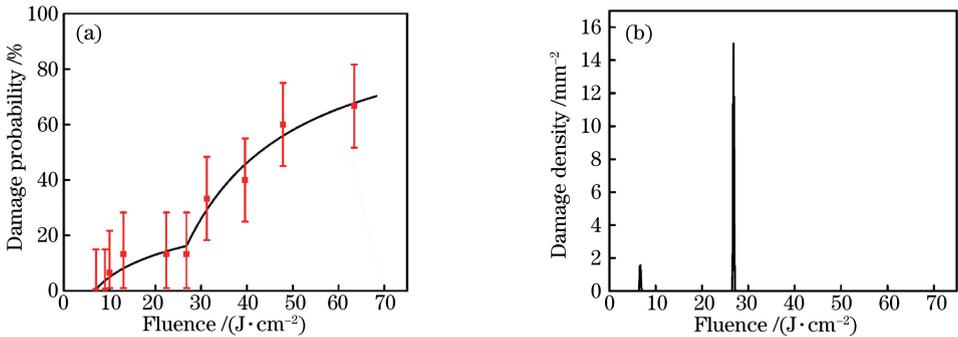


图 8 (a) 基于 1-on-1 激光损伤阈值测试并拟合的损伤概率曲线; (b) 基于高斯分布的统计模型拟合的缺陷信息

Fig. 8 (a) Damage probability curve based on 1-on-1 laser damage threshold test; (b) defect information of statistical model fitting based on Gaussian distribution

由于基于高斯脉冲激光空间分辨法选择的入射激光能量密度为 10 J/cm^2 , 没有达到 1-on-1 激光损伤阈值测量方法中分析得到的第二种缺陷的平均阈

值,因此基于高斯脉冲激光空间分辨法分析只得到一种缺陷。但是对于同一种缺陷而言,1-on-1 与高斯脉冲激光空间分辨法得到了不同的缺陷信息,如

图 9 所示。

由图 9 可知,基于高斯脉冲激光空间分辨法得到的缺陷阈值分布要比 1-on-1 测试法得到的要低,原因在于 1-on-1 测试法是将高斯激光峰值能量密度等效看作诱导所有样品损伤的损伤能量密度,结合其对应的损伤概率与泊松分布分析得到的缺陷信息。而基于高斯脉冲激光空间分辨法是将高斯脉冲激光空间的能量分布以及经过激光辐照后损伤点的空间分布情况相结合考虑的,即对高斯光斑内损伤点的损伤能量密度进行缺陷模拟分析。因此,针对同一种缺陷,高斯激光空间分辨法拟合得到的缺陷平均阈值与缺陷阈值分布要比 1-on-1 激光损伤阈值测量法分析得到的结果要低。

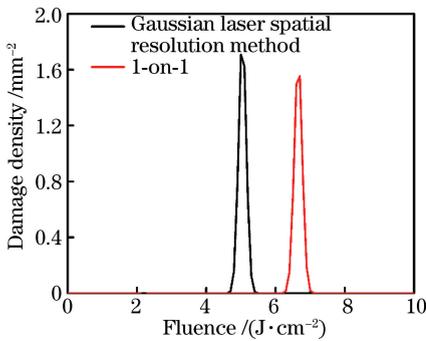


图 9 两种激光损伤阈值测试方法对同一种缺陷的分析结果

Fig. 9 Analysis results of the same defect by two laser damage threshold test methods

4 结 论

提出了一种基于高斯脉冲激光空间分辨测量光学元件表面激光损伤阈值的测试方法,通过对高斯激光光斑进行等能量密度差的能量密度分区,以及对每个能量密度分区的损伤密度进行统计,从而得到待测样品的激光损伤阈值。所提出的测试方法可以运用到反射膜或者增透膜等,相比于国际标准 1-on-1 激光损伤阈值测试方法,所提方法完成了对高斯光斑内能量密度分布以及损伤点分布的细化分析。基于高斯脉冲激光空间分辨测量的光学元件表面激光损伤阈值可以得到更加精确的低损伤阈值缺陷的缺陷信息,同时也有利于更好地研究限制缺陷的方法。

参 考 文 献

[1] Neauport J, Lavastre E, Razé G, *et al.* Effect of electric field on laser induced damage threshold of multilayer dielectric gratings [J]. *Optics Express*, 2007, 15(19): 12508-12522.

[2] Sheehan L M, Schwartz S, Battersby C L, *et al.* Automated damage test facilities for materials development and production optic quality assurance at Lawrence Livermore National Laboratory[C]. *SPIE*, 1998, 3578: 302-313.

[3] Xu J H, Zhao Y A, Shao J D, *et al.* Absorption and laser damage threshold of TiO₂ single films under different process conditions [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0407001.
徐俊海, 赵元安, 邵建达, 等. 不同工艺条件下 TiO₂ 单层膜的吸收和损伤阈值测试 [J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0407001.

[4] Zheng R X, Yi K, Fan Z X, *et al.* Influence of oxygenating port position on properties of HfO₂ films deposited by electron beam evaporation [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1003001.
郑如玺, 易葵, 范正修, 等. 充氧口位置对电子束蒸发沉积 HfO₂ 薄膜性质的影响 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1003001.

[5] Yang M H, Zhao Y A, Su H H, *et al.* Influence of subsurface cracks on the laser damage resistance of anti-reflection coated fused silica [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0807001.
杨明红, 赵元安, 苏涵韩, 等. 基底亚表面裂纹对减反射膜激光损伤阈值的影响 [J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0807001.

[6] Bonod N, Néauport J. Optical performance and laser induced damage threshold improvement of diffraction gratings used as compressors in ultra high intensity lasers [J]. *Optics Communications*, 2006, 260(2): 649-655.

[7] Miao X X, Yuan X D, Lü H B, *et al.* Experimental study of Laser-Induced damage of optical components surface owing to particle contamination in high power laser facility [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0602001.
苗心向, 袁晓东, 吕海兵, 等. 激光装置污染物诱导光学元件表面损伤实验研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602001.

[8] Li D W, Zhao Y A, He H B, *et al.* Exponential fitting of laser damage threshold and analysis of testing errors [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(2): 273-275.
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.

[9] Carr C W, Radousky H B, Rubenchik A M, *et al.* Localized dynamics during laser-induced damage in optical materials [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(8): 087401.

[10] Schaffer C B, Brodeur A, Mazur E. Laser-induced

- breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12 (11): 1784-1794.
- [11] Shi S, Sun M Y, Hao Y F, *et al.* Effect of surface treatment technology on laser damage resistance of aluminum alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(12): 1202001.
时双, 孙明营, 郝艳飞, 等. 表面处理工艺对铝合金抗激光损伤能力的影响[J]. *中国激光*, 2016, 43 (12): 1202001.
- [12] Carr C W, Radousky H B, Demos S G. Wavelength dependence of laser-induced damage: determining the damage initiation mechanisms [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(12): 127402.
- [13] Yuan L G, Chen G, Hou T Y, *et al.* Damage threshold measurement of 2 μm laser on ZnGeP₂ crystal and its influencing factors [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0802001.
苑利钢, 陈国, 侯天禹, 等. 2 μm 激光对磷锗锌晶体的损伤阈值测量及影响因素分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0802001.
- [14] Miller P, Suratwala T, Bude J, *et al.* Laser damage precursors in fused silica [C]. SPIE, 2009, 7504: 75040X.
- [15] Wang H X, SHen L, Li C F, *et al.* Analysis and experimental investigation of laser induced damage of optics[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(3): 0302006.
王洪祥, 沈璐, 李成福, 等. 光学元件激光诱导损伤分析及实验研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44 (3): 0302006.
- [16] Uteza O, Bussiere B, Canova F, *et al.* Laser-induced damage threshold of sapphire in nanosecond, picosecond and femtosecond regimes [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254(4): 799-803.
- [17] Liu X F, Li D W, Li X, *et al.* 1064 nm laser conditioning effect of HfO₂/SiO₂ high reflector deposited by e-beam[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36 (6): 1545-1549.
刘晓风, 李大伟, 李笑, 等. 电子束蒸发制备 HfO₂/SiO₂高反膜的 1064 nm 激光预处理效应[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1545-1549.
- [18] Rudolph W, Emmert L A, Sun Z, *et al.* Laser damage in thin films—what we know and what we don't[C]. SPIE, 2013, 8885: 888516.
- [19] Xu C, Yao J, Ma J, *et al.* Laser-induced damage threshold in n-on-1 regime of Ta₂O₅ films at 532, 800, and 1064 nm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(12): 727-729.
- [20] Chimier B, Utéza O, Sanner N, *et al.* Damage and ablation thresholds of fused-silica in femtosecond regime [J]. *Physical Review B*, 2011, 84 (9): 094104.
- [21] Trinavarat A, Atchaneeyasakul L, Udompunterak S. Neodymium: YAG laser damage threshold of foldable intraocular lenses [J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2001, 27(5): 775-780.
- [22] "ISO 11254-2, Laser and laser-related equipment. determination of laser-induced damage threshold of optical surface-part 1: S-on-1 test," ISO ISO 11254-2: 2001(2001).
- [23] Hu J P, Xin Z, Li S G, *et al.* Image processing method for laser damage probability measurement by single-shot of laser pulse[J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10625-10631.
- [24] Liu Z, Zheng Y, Pan F, *et al.* Investigation of laser induced damage threshold measurement with single-shot on thin films [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 382: 294-301.
- [25] "ISO 21254-1: 2011: Test methods for laser induced damage threshold—part 1: Definitions and general principles," ISO ISO 21254-1: 2011(2011).
- [26] Xu Y J, Emmert L A, Rudolph W. Spatio-temporally resolved optical laser induced damage (STEREO LID) technique for material characterization[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21607-21614.
- [27] Krol H, Gallais L, Grezes-Besset C, *et al.* Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing[J]. *Optics Communications*, 2005, 256(1/3): 184-189.
- [28] Natoli J Y, Gallais L, Akhouayri H, *et al.* Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms [J]. *Applied Optics*, 2002, 41 (16): 3156-3166.