

光学薄膜激光损伤阈值测量不确定度

徐均琪¹, 苏俊宏¹, 葛锦蔓¹, 基玛 格拉索夫²

(1. 西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021;
2. 白俄罗斯国立信息与无线电电子大学, 白俄罗斯 明斯克 220013)

摘要: 光学薄膜的激光损伤阈值是评价其激光耐受性能好坏的一个重要指标。对薄膜激光损伤阈值的准确评价和测定, 是判断其激光耐受性能和进行相互对比的基础。通过对激光损伤阈值测试系统误差的溯源分析和计算机模拟, 给出了优化测试系统的方向。研究表明: 在激光光斑确定的情况下, 激光能量越高, 能量密度的误差越大。因此在满足需要的情况下, 应该尽可能选取较低的激光能量。在激光能量确定的情况下, 存在一个临界光斑, 当小于临界光斑时, 能量密度误差变化非常剧烈, 光斑越小, 能量密度误差越大。测试系统的激光光斑大于临界光斑时系统的误差较小, 小于临界光斑时系统的误差急剧变大。因此, 在激光损伤阈值测试系统中, 应该优选临界光斑或者大于临界光斑。激光损伤阈值拟合产生的最大误差为最大能级的激光能量误差, 因此要尽可能降低激光器的脉冲能量。由此可见, 设计合理的系统参数, 可以最大程度降低测量结果的不确定度。

关键词: 激光损伤阈值; 薄膜; 测量不确定度; 损伤

中图分类号: O484 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0806007

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

Xu Junqi¹, Su Junhong¹, Ge Jinman¹, Golosov Dmitriy A²

(1. Shaanxi Province Thin Film Technology and Optical Test Open Key Laboratory, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk 220013, Belarus)

Abstract: The laser-induced damage threshold (LIDT) of optical films is an important index for assessing the film's properties of laser tolerance. Accurate measurement for the LIDT is the foundation of laser tolerance estimation and data comparison of the thin films. Based on the analysis and computer simulation, the optimization ways of laser-induced damage threshold was presented in this paper. The results show that the error of the energy density increased with the increase of the laser energy at a fixed laser spot. Therefore, in the case of satisfying the need, it is better to choose low laser energy for the testing system. Under the fixed laser energy, there will be a critical laser spot. The error of the energy density changed strongly with the spot size change: smaller spot size, bigger energy density error. The small gentle energy density error can be obtained at the laser spot size greater than the critical laser spot, vice versa. Therefore, it is better to choose the spot size equal or greater than the critical laser spot size.

收稿日期: 2016-12-10; 修订日期: 2017-01-20

基金项目: 国际科技合作资助项目(2013DFR70620); 国家自然科学基金(61378050)

作者简介: 徐均琪(1973-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学薄膜及光学检测方面的研究。Email: jqxu2210@163.com

The fitting maximum error is equal to that of the error of the maximum laser energy level. Thus it can be seen that the uncertainty of a LIDT test system can be reduced through designing suitable laser parameters.

Key words: LIDT; thin film; measurement uncertainty; damage

0 引言

在大功率高能激光系统中,存在大量的薄膜元件,这些元件的抗激光损伤能力与系统能否正常运行密切相关。众所周知,薄膜元件在强激光下的破坏一般由元件表面薄膜的抗激光能力所决定。因此,随着大功率激光器应用范围的不断扩大,薄膜抗激光损伤性能的重要性日益突出,以致激光损伤阈值(laser-induced damage threshold, LIDT)成为光学薄膜元件不可缺少的一项重要指标。许多研究者曾经就如何提高薄膜激光损伤能力进行了深入研究^[1-3],如何获得高激光损伤阈值已经成为光学元件激光防护性能的主要瓶颈,解决这一问题对大功率激光系统的应用及激光加固具有重要意义。而要解决这一问题,关键在于准确测出薄膜的激光损伤阈值,因而对光学薄膜激光损伤阈值的测试成为亟待解决的首要问题。

事实上,有关薄膜激光损伤阈值测试方法的研究近年来一直是国内外激光薄膜研究领域的热点问题^[4-6]。尽管国际标准化委员会颁布了相关测试标准,即 ISO11254-1 和 ISO11254-2,这是对激光引起光学薄膜损伤而制定的国际标准,国内也建立了相应国家标准^[4]。但是,迄今为止,国内外尚不符合相应标准的商品化测试仪器和设备,严重制约了激光薄膜的研究和发展。许程等人研究了离子束溅射制备 Ta₂O₅ 薄膜的激光损伤阈值,采用 1 064 nm 波长,12 ns 脉宽激光测量,得到薄膜最高的损伤阈值为 16.8 J/cm^{2[7]}。而蒲云体等人同样采用离子束溅射的方式,制备了 1 064 nm 高反射 Ta₂O₅/SiO₂ 多层薄膜,采用同样的激光波长和脉冲宽度,测量高反膜的损伤阈值为 38.4 J/cm^{2[8]}。对其他薄膜的研究也发现类似的情况:Amir Hassanpour 研究了热蒸发技术制备 TiO₂ 薄膜在不同退火条件下的激光损伤特性,采用 1 064 nm 波长,12 ns 激光测量得到的激光损伤阈值为 4.2~5.87 J/cm^{2[9]}。而采用同样的薄膜制备方

法和测试参数,Alireza Banane 制备的 TiO₂ 薄膜的激光损伤阈值为 9.79 J/cm^{2[10]}。由此可见,同种材料的激光损伤阈值也存在很大差异,虽然制备工艺会造成一定影响,但很大程度却源于测量的不确定度。

目前,各单位对薄膜损伤阈值的测量,都是在自己搭建的测试平台上进行的,其结果存在较大的差异,这给不同单位的结果比对造成了很大困惑。产生这一现象的原因,其一是因为国际标准 ISO11254 所推荐的相衬显微法判别薄膜损伤主观性很强,工作强度大,测试效率低,难以实现整机系统的自动化。其二是因为目前对薄膜损伤与否的判别方式存在较大争议。虽然研究者们已经提出了多种判别薄膜损伤的方法,但由于这些方法各有其优劣性,任何一种单一判别方法都不能同时实现对所有激光薄膜及元件的可靠、准确测量。其三,虽然一些研究者建立了薄膜激光损伤阈值的测试平台,但激光损伤阈值极其复杂,它不仅取决于脉冲宽度、激光模式,还取决于激光能量、光斑面积等因素,致使不同单位之间的测量结果千差万别,阈值测量结果的可比性差。基于以上讨论,文中对激光损伤阈值测试系统的不确定度进行了研究,期望为不同测试系统的数值比对以及系统优化提供参考。

1 激光损伤阈值测试原理

薄膜的激光损伤阈值 E_{th} 定义为对一特定的薄膜破坏形态,破坏概率为零处的激光脉冲通量,即单位面积上的激光能量(J/cm²)。文中的激光损伤阈值测试系统对于薄膜的损伤判定采用相衬显微法,对激光损伤阈值的测试参照国际标准 ISO11254-1 采用 1-on-1 零几率损伤法^[11]:即用特定能量的单脉冲照射样品表面不同位置的 $m(m=10)$ 个点,记录下损伤的点数 n ,则该能级下激光辐照损伤概率为 $P=n/m$ 。逐渐增加激光能量,再测出该能级下的损伤概率,直至测量出 10 个能级下的损伤几率。选定损伤几率为 0~100% 的能级和各能级的损伤几率,以

激光能量为横轴,损伤几率为纵轴,得出损伤几率与激光能量点的分布,再用直线拟合并外推到零损伤几率,所对应的激光能量值除以光斑面积即为激光损伤阈值。

为了实现上述测试过程,文中研究采用的薄膜激光损伤阈值测试系统如图 1 所示。从激光器发出的激光,经过透镜组扩束准直后,进入衰减器系统。能量衰减系统由几组衰减比率不同的衰减片组成,通过调整不同衰减比率的组合来改变入射到样品表面的激光能量以获得不同的能级。用 NewPort 能量计测量入射到样品表面的激光能量。经过能量调节的激光束,通过会聚透镜聚焦于样品表面。脉冲激光每辐照一次,工作台则移动一定的位移,从而保证每个激光脉冲作用于不同的样片表面。测试所用激光器为基模(TEM00)调 Q Nd:YAG 激光器,激光波长为 1 064 nm,脉宽 10ns,能量为准高斯分布,最大能量 400 mJ,聚焦光斑为 $\Phi 0.84$ mm。测试样品装夹在一个由步进电机驱动的二维平台上。用 He-Ne 激光器进行整个系统的光路准直。以每个能级的入射光照射薄膜表面 10 个点,为避免激光预处理的影响,点与点之间相互隔开,测试点间距为 1 mm,共测试 100 点,从而可拟合出薄膜的激光损伤阈值。

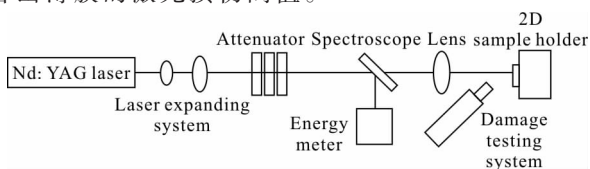


图 1 薄膜的损伤阈值测试装置

Fig.1 Laser-induced damage threshold test system of films

2 测试系统不确定度分析

如前所述,激光损伤阈值是根据多次测量得到的损伤几率拟合获得的。由于激光脉冲能量与光斑面积的比值为激光能量密度,因此激光损伤阈值就是破坏概率为零时的激光能量密度。整个系统的不确定度主要来源于激光能量密度误差、拟合误差和损伤判别误差。

2.1 能量及光斑大小对测量结果的影响

由于能量密度 E_d 表示为激光脉冲能量 q 与光斑面积(πr^2)的比值,可用公式表示为:

$$E_d = \frac{q}{s} = \frac{q}{\pi r^2} \quad (1)$$

对公式(1)进行偏微分,可得能量密度误差

$$\Delta E_d = \frac{1}{\pi r^2} \Delta q - \frac{2q}{\pi r^3} \Delta r \quad (2)$$

由此可见,能量密度误差不仅取决于脉冲激光能量和光斑半径,还取决于能量误差及光斑尺寸误差。激光脉冲能量误差是由激光器特性决定的,在同一标称能量下,激光器输出的每个脉冲能量不可能完全一致,而是存在一个误差,假设其不同能量的百分比误差为 t ,则 $\Delta q = qt$,于是公式(2)变为:

$$\Delta E_d = \frac{1}{\pi r^2} qt - \frac{2q}{\pi r^3} \Delta r \quad (3)$$

由此,笔者建立了能量密度误差与所作用激光能量大小、能量误差、激光光斑半径和半径误差之间的关系。

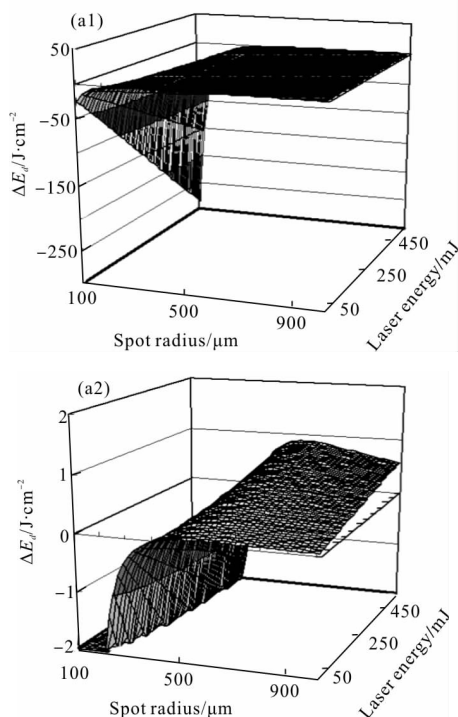
激光光斑半径的测量可以采用相纸采集光斑大小,然后用显微镜进行测量,或者用刀口法直接测量。对尺寸的测量为等精度测量,测量误差可以保证在 10 μ m 以内,在模拟中设定其值为 10 μ m。激光器能量误差 t 可以采用实验测试的方法得到。表 1 是根据 Nd:YAG 激光器在不同电压下输出 100 个脉冲的能量(1 064 nm, 10 ns)测试点计算的参数,可以看出,激光器输出能量不同,其能量误差也不同,当激光能量为 203.89 mJ, 329.431 mJ 和 404.694 mJ 时,激光能量最大误差分别为 3.04%, 4.54% 和 1.17%。因此在模拟中,设定其值为 5%、3% 和 1%。计算机模拟的结果如图 2 所示。

表 1 不同输入电压下激光器输出能量的统计参数
Fig.1 Statistical parameters of the laser output energy at various input voltages

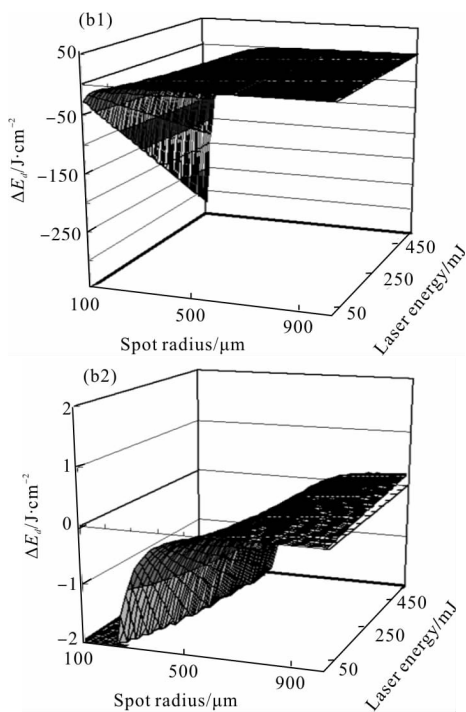
Voltage /V	Average energy /mJ	Standard deviation /mJ	Minimum energy /mJ	Maximum energy /mJ	Energy error
710	203.89	2.796	197.1	210.3	3.04%
885	329.431	8.043	318.7	345.1	4.54%
980	404.694	2.127	400.4	409.5	1.17%

由图 2 中可见,当激光光斑确定时,能量密度误差可能为正值,也可能为负值:当误差为负值时,随着激光能量的增加,误差的绝对值越来越大;当误差

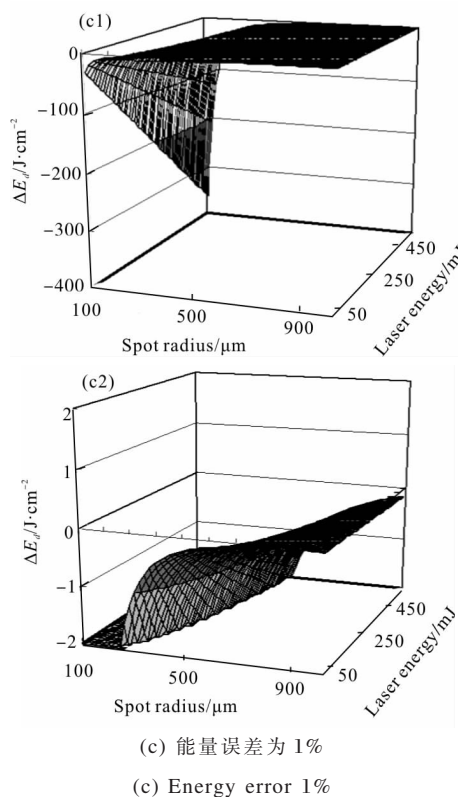
为正值时,随着激光能量的增加,误差也越来越大。由此可见,在激光光斑确定的情况下,随着激光能量升高,能量密度的误差越大。



(a) 能量误差为 5%
(a) Energy error 5%



(b) 能量误差为 3%
(b) Energy error 3%



(c) 能量误差为 1%
(c) Energy error 1%

图 2 不同参数下的能量密度误差

Fig.2 Errors of energy density at various laser parameters

在同一激光能量下,光斑从小变大时,能量密度误差从负值逐渐变化为正值,且光斑越小,激光能量密度的误差越大。当光斑大于某个数值后,虽然随着光斑大小的增加,能量密度误差逐渐变大,但其变化比较平缓。也就是说,对于一个激光损伤阈值测试系统,存在一个临界光斑,而当小于临界光斑时,能量密度变化非常剧烈,光斑越小,能量密度误差越大。由此说明,在激光损伤阈值测试系统中,光斑直径不宜太小,否则会引起极大的测量误差。当光斑大于临界光斑时,误差并非随着光斑变大一直增大,而是如图 2(a)所示,存在一个最大误差点。

进一步分析可知,当激光光斑大小为临界光斑时,可以使得能量密度误差为 0,而与激光能量大小无关,这一点还可从理论分析得到证明。如果令能量密度误差的表达式等于 0,即

$$\Delta E_d = \frac{1}{\pi r^2} \Delta q - \frac{2q}{\pi r^3} \Delta r = \frac{1}{\pi r^2} q t - \frac{2q}{\pi r^3} \Delta r = 0 \quad (4)$$

可以解算得到:

$$t - \frac{2\Delta r}{r} = 0 \quad (5)$$

$$r = \frac{2\Delta r}{t} \quad (6)$$

也就是说, 能够使能量密度误差为 0 的光斑大小, 与光斑尺寸误差和激光能量大小误差密切相关。当半径误差为 10 μm, 激光能量误差为 5%、3% 和 1% 时, 对应的激光临界光斑大小分别为 400 μm、666.67 μm 和 2 000 μm。如果测试系统实际的光斑大于临界光斑, 则系统的误差较小, 如实际的光斑小于临界光斑, 则系统的误差急剧变大。李大伟等人的研究也发现, 测试光斑面积以及测试点数会影响损伤概率的准确性。测试光斑面积越大, 同一能量台阶的脉冲测试的点数越多, 得到的损伤概率越准确^[6]。根据文中的研究, 光斑的选取应优先选取临界光斑, 或者大于临界光斑, 所产生的能量密度误差较小。如果激光器输出不同能量时的误差相同, 则应该选取较低的激光能量。

但是, 一般来说, 激光损伤阈值测试系统都是采用固定的入射激光能量, 为了得到不同能级的激光能量, 常常采用不同衰减片组合来衰减的实现方式, 因此, 如果测量的激光损伤阈值较低, 相应的激光能量也越小, 就应选取较低的入射激光能量, 这样产生的能量密度误差则越小。相反, 如果测量的激光损伤阈值较高, 那么入射激光能量也会较高, 则误差也更大。

对于文中研制的激光损伤阈值测试系统, 实际测得入射激光能量为 200 mJ, 即 $Q=0.2$ J, 能量误差为 5%, 因此误差 $\Delta Q=0.2 \times 5\%=0.01$ J, 实测光斑大小, $r=0.042$ cm, $\Delta r=0.001$ cm, 带入上式计算得到:

$$\Delta E_d = \frac{1}{\pi r^2} \Delta Q - \frac{2Q}{\pi r^3} \Delta r = \frac{0.01}{3.14 \times 0.04^2} - \frac{2 \times 0.2 \times 0.001}{3.14 \times 0.04^3} = 0.09 \text{ J/cm}^2 \quad (7)$$

2.2 拟合误差

激光损伤阈值的获取是对测试到的不同的激光能量-损伤几率进行线性拟合, 外推至横坐标而得到的值, 见图 3。其中, 横坐标为激光能级, 纵坐标为该能级下的损伤几率。假定直线 L 是拟合的直线, 则 P_0 点是零几率损伤的最大激光能量, 根据激光能量 e_0 即可确定薄膜的激光损伤阈值。设 $P_1(e_1, p_1)$ 和 $P_2(e_2, p_2)$ 是直线上的两个点, 很容易得到这两点的线性方程:

$$y = \frac{p_2 - p_1}{e_2 - e_1} x + \frac{p_1 e_2 - p_2 e_1}{e_2 - e_1} \quad (8)$$

外推到零几率时的激光能量为:

$$e_0 = \frac{1}{p_2 - p_1} (p_2 e_1 - p_1 e_2) \quad (9)$$

假设损伤几率的计算不产生误差, 则上式的误差主要产生于激光能量 e 的误差。两边取微分, 得到:

$$\Delta e_0 = \frac{1}{p_2 - p_1} (p_2 \Delta e_1 - p_1 \Delta e_2) \quad (10)$$

Δe_0 的大小直接决定着 LIDT 的误差大小。根据图 2 的结论, 如选取的激光光斑大于临界光斑, 这时能量密度的误差较小且为正值。因为 $p_2 > p_1$, $\Delta e_2 > \Delta e_1$, 则

$$\Delta e_0 = \frac{1}{p_2 - p_1} (p_2 \Delta e_1 - p_1 \Delta e_2) < \frac{1}{p_2 - p_1} (p_2 \Delta e_2 - p_1 \Delta e_2) = \Delta e_2 \quad (11)$$

$$\Delta e_0 = \frac{1}{p_2 - p_1} (p_2 \Delta e_1 - p_1 \Delta e_2) > \frac{1}{p_2 - p_1} (p_2 \Delta e_2 - p_1 \Delta e_2) = \Delta e_1 \quad (12)$$

也就是说, 拟合产生的最大误差为最大能级的激光能量误差。当光斑大小 $r=0.042$ cm, 激光器入射能量为 100 mJ 时, 薄膜一般均发生损伤, 这时, 对应能量误差为 1% 的激光脉冲, 拟合带来的损伤阈值误差为:

$$\Delta_{fit} = \frac{\Delta e}{\pi r^3} = \frac{0.1 \times 0.01}{3.14 \times 0.04^2} = 0.18 \text{ J/cm}^2 \quad (13)$$

同样可以计算出能量误差为 3% 和 5% 时, 拟合带来的损伤阈值误差为 0.54 J/cm² 和 0.9 J/cm²。

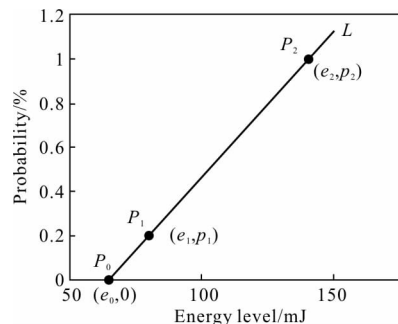


图 3 拟合误差产生示意图

Fig.3 Schematic diagram of fitting error

2.3 损伤判别误差

国际标准 IS011254 中规定, 薄膜激光损伤阈值

是根据不同能级激光损伤的几率外推而来的,这就带来了另外一个问题,强激光作用后,薄膜表面是否发生损伤,对其检测可能存在一定的误判,误判会造成损伤几率计算出现错误。一般来说,损伤是指用规定的检测技术能够观测到样品表面特征的任何激光诱导的变化。国际标准规定,观测样品形貌变化需要使用放大倍率为 100~150 倍的 Nomarski 相衬显微镜,在强激光辐照前后对测试点进行检测,从样品外观形貌的变化情况能够得出损伤是否发生的结论。用这种方法判断薄膜样片是否发生损伤,具有一定的主观性。为了便于测试系统实现自动化,目前研究者开发了多种损伤判别的方法,有图像法、散射光强法、等离子体闪光法、等离子体光谱法、声谱法、光热偏转法等^[12-15],但这些方法也或多或少存在一定的问题。为了便于讨论,文中暂不考虑损伤判别带来的误差。

一般来说,对于测试系统,应该给出测量值的分散性,即给出不确定度的数值,因此,根据不确定度的合成理论,激光损伤阈值测试系统不确定度最终由最大能量密度误差和最大拟合误差合成给出:

$$U_{LIDT} = (E_{dmax}^2 + \Delta_{fitmax}^2)^{1/2} \quad (14)$$

3 结 论

光学元件或薄膜的激光损伤阈值是评价其激光防护性能好坏的一个重要指标。但目前缺少商业化的激光损伤阈值测试仪器,各个单位在自己搭建的平台上测试的激光损伤阈值缺乏可比性。文中通过对测试系统误差的深入分析,明确了造成这种可比性差的主要原因,给出了优化测试系统性能的方向。研究表明,在激光光斑确定的情况下,激光能量越高,能量密度的误差越大。因此在满足需要的情况下,应该尽可能选取较低的人射激光能量。在激光能量确定的情况下,存在一个临界光斑,当小于临界光斑时,能量密度误差变化非常剧烈,光斑越小,能量密度误差越大。因此,在激光损伤阈值测试系统中,光斑直径不宜太小,否则会引起极大的测量误差。当激光光斑大小为临界光斑时,理论上可以使得能量密度误差为 0。当半径测量误差为 10 μm ,激光能量误差为 5%、3% 和 1% 时,对应的激光临界光斑大小分别为 400 μm 、666.67 μm 和 2 000 μm 。

如果测试系统实际的光斑大于临界光斑,则系统的误差较小,如实际的光斑小于临界光斑,则系统的误差急剧变大。

一般来说,如果测量的激光损伤阈值较低,相应的人射激光能量也越小,产生的误差则越小。相反,如果测量的激光损伤阈值较高,则误差也更大。对于理想设计的激光损伤阈值测试系统,当实际的激光能量为 200 mJ,能量误差为 5%,光斑大小 $r=0.042$ cm, $\Delta r=0.001$ cm 时,能量密度误差约为 0.09 J/cm²。

激光损伤阈值拟合也会带来误差,拟合产生的最大误差为最大能级的激光能量误差。

总体来说,激光损伤阈值的测量不确定度产生于能量密度误差和拟合误差,在很大程度上取决于激光光斑大小和激光能量,设计并选用合理的参数匹配,可以最大程度降低测量结果的不确定度。

参 考 文 献:

- [1] Chi Fangtin, Zhang Qian, Zhang Lingjie, et al. Nanostructured magnesium fluoride antireflective films with ultra-high laser induced damage thresholds [J]. *Materials Letters*, 2015, 150: 28-30.
- [2] Zhu Meiping, Yi Kui, Li Dawei, et al. Influence of SiO₂ overcoat layer and electric field distribution on laser damage threshold and damage morphology of transport mirror coatings [J]. *Optics Communications*, 2014, 319: 75-79.
- [3] Zhou Chenghu, Zhang Qiuhui, Huang Mingming, et al. Damage effects of impurity particles on film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0721004. (in Chinese)
周成虎, 张秋慧, 黄明明, 等. 杂质微粒对薄膜的损伤效应[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 0721004.
- [4] Zhu Yaonan. Discussion of the measurement methods for laser induced damage threshold of optical coating [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 532-535. (in Chinese)
朱耀南. 光学薄膜激光损伤阈值测试方法的介绍和讨论[J]. *激光技术*, 2006, 30(5): 532-535.
- [5] Hu Jianping, Ma Ping, Xu Qiao. Laser damage threshold measurement of the optical elements [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 187-191. (in Chinese)
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.
- [6] Li Dawei, Zhao Yuan'an, 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. (in Chinese)
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.
- [7] Xu Cheng, Dong Hongcheng, Xiao Qiling, et al. Optical properties and laser-induced damage threshold of Ta₂O₅ films deposited by different methods [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1595–1599. (in Chinese)
许程, 董洪成, 肖祁陵, 等. 不同方法制备的 Ta₂O₅ 薄膜光学性能和激光损伤阈值的对比分析 [J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1595–1599.
- [8] Pu Yunti, Chen Songlin, Qiao Zhao, et al. Multi-shot laser damage effects on Ta₂O₅/SiO₂ gradient-index optical thin film [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(2): 022019–1–4. (in Chinese)
蒲云体, 陈松林, 乔翌, 等. 渐变折射率 Ta₂O₅/SiO₂ 薄膜多脉冲激光损伤特性 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(2): 022019–1–4.
- [9] Amir Hassanpour, Alireza Bananej. The effect of time-temperature gradient annealing on microstructure, optical properties and laser-induced damage threshold of TiO₂ thin films [J]. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(1): 35–39.
- [10] Alireza Bananej, Amir Hassanpour, Hossein Razzaghi, et al. The effect of porosity on the laser induced damage threshold of TiO₂ and ZrO₂ single layer films [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(8): 1187–1192.
- [11] International Standard: ISO11254-1-2000, Laser and laser-related equipment –determination of laser-induced damage threshold of optical surface–part1: 1-on-1 test [S], 2000.
- [12] Tan Hengying, Liu Pengcheng, Shi Baixuan. Non destructive testing of laser induced damage in optical thin films by laser photothermal deflection image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1): 158–160. (in Chinese)
谈恒英, 刘鹏程, 施柏焯. 激光光热偏转成像法无损检测光学薄膜的激光损伤 [J]. 光子学报, 2005, 34(1): 158–160.
- [13] He Changtao, Ma Zi, Chen Jianguo, et al. The method of judging film damage based on image similarity [J]. *Laser Journal*, 2007, 28(1): 60–61. (in Chinese)
何长涛, 马孜, 陈建国, 等. 基于图像相似的薄膜激光损伤识别 [J]. 激光杂志, 2007, 28(1): 60–61.
- [14] Lou Jun, Su Junhong, Xu Junqi, et al. Laser-induced damage threshold detection for optical thin films by scattered light of He-Ne laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(1): 131–135. (in Chinese)
娄俊, 苏俊宏, 徐均琪, 等. He-Ne 散射光检测光学薄膜激光损伤阈值 [J]. 应用光学, 2008, 29(1): 131–135.
- [15] Wu Zhouling, Fan Zhengxiu, Su Xing, et al. In-situ investigation of laser-induced damage in optical coatings by photothermal deflection technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, 10(3): 245–252. (in Chinese)
吴周令, 范正修, 苏星, 等. 光学薄膜激光损伤的光热偏转法实时研究 [J]. 光学学报, 1990, 10(3): 245–252.