

激光与光电子学进展

周期性表面光学元件激光损伤阈值的拟合

李媛, 苏俊宏*, 徐均琪, 杨利红, 杨国梁

西安工业大学光电工程学院, 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710021

摘要 光学元件的激光诱导损伤阈值是衡量其抗激光损伤能力的重要指标。周期性表面光学元件具有良好的光学特性, 在高功率激光系统中也有着潜在的应用, 准确测定其激光诱导损伤阈值尤为关键。本文分析了激光诱导损伤阈值不确定度的主要来源, 建立了激光诱导损伤阈值不确定度的计算公式, 给出了减小激光损伤阈值不确定度的处理方法。结果表明: 当激光的标定光斑半径为 $400\ \mu\text{m}$ 、误差为 $10\ \mu\text{m}$ 、激光能量误差为 5% 时, 能量密度引入的不确定度为 0。则激光损伤阈值的不确定度主要来源为损伤几率不确定度和线性拟合不确定度。通过增加每一能量级的测量次数, 可以进一步减小激光损伤阈值的不确定度。

关键词 光学元件; 周期性表面; 激光诱导损伤阈值; 不确定度

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2320001

Fitting Model of Laser-Induced Damage Threshold for Optical Elements with Periodic Surface

Li Yuan, Su Junhong*, Xu Junqi, Yang Lihong, Yang Guoliang

Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Film Technology and Optical Test, College of Opto-Electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract The laser-induced damage threshold of optical elements is a key indicator for measuring laser damage resistance. Optical elements with periodic surfaces have advantageous optical characteristics and potential applications in high-power laser systems. It is important to determine the laser-induced damage threshold accurately. In this paper, the main sources of uncertainty are analyzed, a calculation formula for the uncertainty of laser-induced damage threshold is established, and the processing methods for reducing the uncertainty of laser-induced damage threshold are provided. The results show that when the spot radius is $400\ \mu\text{m}$, the error is $10\ \mu\text{m}$, the laser energy error is 5% , and the uncertainty introduced by energy density is zero. Then, the main factors contributing to the uncertainty of the laser damage threshold are the uncertainty of the damage probability and that of the linear fitting. The precision of the laser-induced damage threshold can be further improved by increasing the number of measurements for each energy level.

Key words optical element; periodic surface; laser-induced damage threshold; uncertainty

1 引言

光学元件的抗激光损伤能力是制约高功率激光输出功率的关键因素之一^[1], 而光学元件是高功率激光系统中不可或缺的。周期性表面光学元件有着良好的光学特性^[2-3]或光谱^[4]特性, 并逐步成为薄膜元件在高功率激光系统应用中的有效替代品^[5-6], 其激光诱导损伤阈值(LIDT)的准确测定是评价其抗激光损伤性能优劣的重要指标。

根据损伤测试标准 ISO21254-2^[7], 光学元件的激光诱导损伤阈值的评定方法有零几率损伤和 50% 几率损伤两种。激光损伤阈值的大小与激光器的输出参数密切相关^[8]。Du 等^[9]研究了熔石英表面一维周期性分布的减反射光栅的激光损伤特性。采用 1064 nm 脉宽为 12 ns 的激光器对其表面进行辐照测试, 获取了平均 LIDT 值 $30.75\ \text{J}/\text{cm}^2$, 与之比较的多层介质薄膜的 LIDT 值 $25.9\ \text{J}/\text{cm}^2$ 。史帅凯等^[10]研究了一维横截面为梯形的周期性表面, 即一维光栅。采用 S-on-1 测试

收稿日期: 2021-09-29; 修回日期: 2021-11-05; 录用日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(61378050)

通信作者: *sujhong@126.com

方式,在单脉冲脉宽 10 ns、频率 10 Hz、TEM00 模式、 0° 入射条件下,分别测试了 S 光、P 光辐照时的 LIDT。结果表明:S 光的 LIDT 约为 P 光 LIDT 的 5 倍。Liu 等^[11]采用 1064 nm 脉宽为 10 ns 的 Nd:YAG 激光器辐照纳米方形二维周期性表面,激光的光斑直径为 500 μm , LIDT 值为 52 J/cm^2 。Teng 等^[12]按照 ISO 21254-2 的标准,采用 1064 nm 激光脉宽为 12 ns 的激光器 0° 辐照亚波长“夜蛾复眼”结构,执行 1-on-1 作用方式,这种周期性表面的 LIDT 为 42.57 J/cm^2 。

在同等的测试条件下,通常按照 ISO 21254-2 的要求进行激光损伤阈值的测试工作。但是,不难看出 LIDT 没有给出不确定度,尽管阈值的测试是在同一测试系统上进行的,但阈值的测试结果却因测试条件、环境甚至人为的因素而偏差较大。然而,LIDT 的准确度为后续的研究工作提供了关键的数据参考,对于光学元件表面为周期性结构的这类光学元件,表面在实际制备时不可能绝对的对称分布,使得 LIDT 值在不同方向上表现出性能的差异和阈值的差异^[10]。因此,当能量级递增时,损伤几率不一定是线性增长,在拟合时会出现较大的偏差。本文从原理上分析了影响 LIDT 不确定度的处理方法,提出了 LIDT 不确定度的数据拟合的计算模型,分析了减小不确定度的数据处理方法,提高了阈值测试结果的可信度。本文以氧化

硅薄膜上的六边形周期性孔阵列结构样片(属于二维光栅)为研究对象,按照光学元件激光损伤测试标准 ISO21254-2,采用波长为 1064 nm、脉宽为 10 ns 的 Nd:YAG 激光器按照 1-on-1^[7]的作用方式辐照周期性表面,激光束束形为高斯分布,光斑直径为 800 μm ,模式是 TEM00,偏振态为圆偏振。采用零几率损伤评价方法,通过对实验数据拟合外推到零几率损伤处,所对应的能量密度值就是激光诱导损伤阈值,并给出阈值的测量不确定度。

2 样片的制备及激光损伤阈值测试原理

2.1 样片的制备

采用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)在直径为 6 英寸(1 英寸=2.54 cm),厚度为 1 mm 的光学玻璃晶圆上制备了厚度为 800 nm 的氧化硅薄膜,作为测试所用样片。再通过纳米压印技术及离子束刻蚀工艺对氧化硅层上表面制作了六边形周期性孔阵列的结构。孔的实测平均直径为 345 nm、平均深度为 321 nm、平均周期为 660 nm、孔壁的垂直度为 92.29° 。图 1 给出了扫描电子显微镜(SEM Hitachi S-4800)图。从图 1 可以看出,所制备的周期性纳米孔结构均匀性非常好,纳米孔直径误差不超过 6 nm。

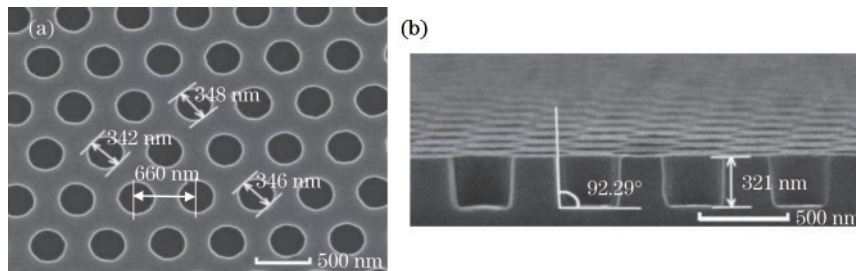


图 1 周期性表面光学元件的 SEM 图。(a)俯视图;(b)横截面图

Fig. 1 SEM micrographs of optical element with periodic surface. (a) Top view; (b) cross-sectional view

2.2 激光损伤阈值测试原理

光学元件的激光损伤阈值是衡量光学元件抗激光损伤能力的指标。根据 ISO21254-2 的标准,此处采用零几率损伤时的能量密度定义光学元件的激光诱导损伤阈值,即单位面积的激光能量(J/cm^2)。本文中,损伤的识别采用图像法,当损伤斑像素点大于 5 时发生损伤,对激光损伤阈值的测试参照国际标准 ISO21254-2,采用 1-on-1 零概率损伤测试法^[7],即用特定能量的单脉冲辐照样片表面不同的 k 个位置,测试的点数越多,实验统计的结果越接近真值,误差就会越小。通常,在样片尺寸允许的情况下,同一能级时辐照的点位不低于 10 个点,根据 1-on-1 的测量原则,每个点位只被辐照一次,记录总的辐照次数及损伤点个数 m ,则该能级的损伤概率为 $p=m/k$ 。随后,进行下一个能级的损伤测试统计,直到完成 $n=10$ 个能级下损

伤测试。能级的选定应覆盖损伤几率 $0\% \sim 100\%$ 范围内,最后采用数据分析法,合成激光诱导损伤阈值及给出阈值的不确定度。

激光损伤测试系统原理示意图如图 2 所示。激光器发出的激光首先经过扩束系统,准直后进入衰减器,再根据测量需求自由配置衰减器获得所需的激光能量。通过分束器将激光束分为两路,用能量计检测激光的一路能量,通过计算获得实际辐照在样片表面的激光能量。透射出分束镜一路的激光经过透镜会聚在样片表面。测试时,每测一个位置,载物台带动样片移动到下一个位置,从而确保每次辐照的样片表面的位置不同。测试时采用的激光器为 Nd:YAG,激光的波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns,光斑符合高斯分布,最大能量为 400 mJ,激光的光斑直径为 0.8 mm,样片最小步进单元为 0.75 mm。通过样片附近的 CCD 采集损

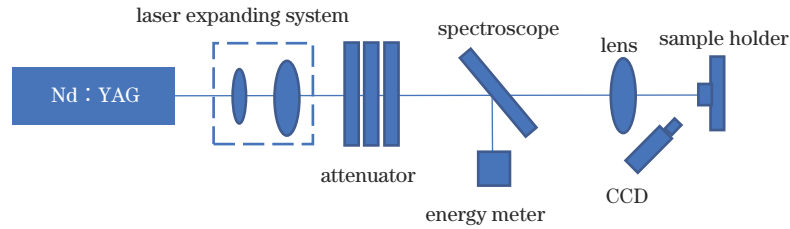


图2 光学元件激光诱导损伤阈值测试系统原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of LIDT test system for optical elements

伤前后图片,比较辐照前后图片中损伤像素的点数,判断是否损伤^[13]。

3 LIDT 不确定度分析

在损伤测试系统中,激光损伤阈值的不确定度主要来源于能量计误差、激光能量密度误差、数据拟合误差及损伤识别误差。其中,相比后三者引入的不确定度而言,能量计引入的误差十分微小,可以忽略不计。并且,采用图像识别损伤法有效地去除了人工误判引入的错误。因此,此处主要考虑激光能量密度误差、各能量级处损伤几率误差及数据拟合误差的影响。通过多次测量,采用数学分析手段获得的零几率损伤时的能量密度值即为光学元件的激光诱导损伤阈值。

3.1 能量密度的不确定度 $u_{\text{rel}}(q)$

激光辐照在光学元件表面的能量密度定义为激光的能量与激光光斑的面积比,即能量密度 $q(\text{J}/\text{cm}^2)$ 等于脉冲激光实际辐照在样片表面的能量 $Q(\text{J})$ 与光斑面积 (πr^2) 的比值,

$$q = \frac{Q}{\pi r^2}. \quad (1)$$

由能量密度公式求一阶导后得到公式能量密度误差公式,

$$dq = \frac{1}{\pi r^2} dQ - \frac{2Q}{\pi r^3} dr = \frac{1}{\pi r^2} Qf - \frac{2Q}{\pi r^3} dr, \quad (2)$$

式中: f 为误差百分比。欲使能量密度误差 dq 等于 0, 需满足如下关系,

$$f = \frac{2}{r} dr. \quad (3)$$

此处,经实验标定激光的光斑半径为 $400 \mu\text{m}$, 尺寸误差为 $10 \mu\text{m}$, 欲使能量密度误差 $dq=0$, 则计算得到能量误差 $f=5\%$ 。在能量区间范围的测试点用于计算损伤几率,从而避免了这一项对不确定度的贡献。

3.2 各能量密度处损伤几率计算的不确定度 $u_{\text{rel}}(p)$

从统计学可知,随着实验次数的无限增加,样本均值的误差可以无限减小。但是,在实际测试中,根据损伤测试的原理,采用有限能级数 ($n=10$) 的实验数据作为样本必然影响损伤测试结果的准确度。

3.3 最小二乘法拟合数据引入的不确定度 $u_{\text{rel}}(L_{\text{th}})$

零几率损伤阈值的确定是通过最小二乘法将拟合的直线与坐标轴相交得到的能量密度值作为激光损伤

阈值,直线拟合的不确定度必然会影响损伤阈值的结果。

4 LIDT 不确定度实例分析

本文以周期性表面光学元件为例,测试并拟合激光诱导损伤阈值,通过之前的分析,我们对每一个环节中引入的不确定度进行计算。在进行激光诱导损伤测试工作前,对这片 6 英寸的样片做了 SEM 扫描测试(图 1),发现周期性表面纳米孔直径的制备误差为 $\pm 3 \text{ nm}$, 孔的理论设计直径为 345 nm 。可见,表面纳米孔的均匀性非常好。为了保证损伤测试的安全性,从该样片上切出 1 片 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的小样片进行测试。

测试时,在小样片边缘处先预测样片不损伤的最大能量密度值及发生损伤的最低能量密度值。然后,按照一定能量比例逐行递增,辐照在小样片上,并记录每一个测试点的能量值及判定是否损伤的两种状态。

4.1 能量密度的不确定度分量 $u_{\text{rel}}(q)$

根据之前的理论分析,欲使能量密度误差为 0, 当给定了光斑实际光斑的测量尺寸为 $400 \mu\text{m}$, 误差为 $10 \mu\text{m}$ 时,能量误差应在 5% 的区间范围内。在实际测量时,为了避免因激光器能量的不稳定因素引入的误差,我们采用设置同一能级时,多次测量的方法。在数据处理时,剔除粗大误差的损伤点,将能量按照由小到大的顺序排列,所选取的标准能量级在 $\pm 5\%$ 范围内,在能量区间内的点,作为该能量级的统计数据,统计是否损伤,作为计算不确定度的原始数据。那么,这一项给不确定度的贡献为 0。

4.2 各能量密度处损伤几率的联合不确定度分量 $u_{\text{rel}}(p)$

由于每一次激光的出射能量不可能完全一样,因此,采用平均的能量密度 p 来替代激光实际出射打在样片表面的能量密度值 p_i , 必然会带来误差。此处,根据下式^[14]可以计算出相对各能量密度处损伤几率不确定度分量,

$$u_{\text{rel}}(p_i) = u(p_i) / (\sqrt{k_i} \times \bar{L}_i), \quad (4)$$

式中: $u(p_i)$ 为标准不确定能量密度; k_i 为同一能量级下的实测点数; \bar{L}_i 为第 i 能量级时的平均能量密度。由

于每一次出射的激光能量不受上一次的影响,因此这些能量密度是相互独立的,且能量密度的不确定度与各能量级处的损伤几率的不确定度独立,则各能量级联合的损伤几率不确定度^[13]为

$$u_{\text{crel}}^2(p) = \sum_{i=1}^n u_{\text{rel}}^2(p_i) \quad (5)$$

表 1 给出了各能量密度下损伤几率不确定度的结果。

表 1 损伤几率计算结果
Table 1 Calculation results of damage probability

Item	n									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Calculated range of energy /mJ	71.25	76	80.75	85.5	90.25	95	99.75	104.5	109.25	114
Standard fluence p /mJ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$\bar{L}_i /(\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	78.75	84	89.25	94.5	99.75	105	110.25	115.5	120.75	126
$u(p_i)$ /mJ	14.93	15.92	16.92	17.91	18.91	19.90	20.90	21.89	22.89	23.89
Damage fraction probability	14.81	15.99	16.95	18.02	18.83	19.96	20.77	21.81	23.97	24.38
k_i	0.118	-0.066	-0.031	-0.106	0.079	-0.056	0.130	0.085	-1.080	-0.495
$P/\%$	1/8	2/11	4/15	5/23	5/19	6/16	7/16	6/13	4/9	5/8
	8	11	15	23	19	16	16	13	9	8
	12.5	18.2	26.7	21.7	26.3	37.5	43.8	46.2	44.4	62.5

4.3 最小二乘法拟合数据引入的不确定度 $u_{\text{crel}}(L_{\text{th}})$

当进行完损伤测试后,这些数据是通过最小二乘法进行线性拟合的,外推与几率坐标轴相交,对应于零几率损伤时的能量密度就是样片的激光诱导损伤阈值。其中,线性回归方程表示为

$$\hat{L} = a \cdot p + b, \quad (6)$$

式中: a 为线性拟合方程的回归系数; b 为零几率损伤处的能量密度; p 为标注能量密度。以每个能量级下对应的损伤几率作为 x 坐标,以标准能量密度值作为 y 坐标。采用最小二乘法和 Matlab 编程对实验数据进行拟合,得出线性回归方程为 $y=0.1869x+13.0562$ 。其中, a 和 b 分别为0.1869和13.0562。根据线性拟合产生的不确定度的计算公式^[15-16]可得

$$u_{\text{crel}}(L_{\text{th}}) = s(b)/b, \quad (7)$$

式中: $s(b)$ 和 $s(L)$ 分别为零几率损伤及线性拟合过程中能量密度的标准不确定度。

$$s(b) = s(L) \left\{ n^{-1} + \bar{p}^{-2} \left[\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \right]^{-1} \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

$$s(L) = [(n-2)^{-1} \sum_{i=1}^n (\bar{L}_i - L_i)^2]^{1/2}, \quad (9)$$

式中: L_i 代表当损伤几率为 p_i 时,计算所采用的能量密度或叫标准能量密度; \bar{p} 代表平均损伤几率。表 2 给出了线性拟合的能量密度不确定度的计算结果。

表 2 线性拟合能量密度不确定度计算结果

Table 2 Calculation results of energy density uncertainty for linear fitting

Item	Uncertainty
$s(b)$	0.343
$s(L)$	0.429
$u_{\text{crel}}(L_{\text{th}}) / \%$	2.630

4.4 激光损伤阈值相对合成不确定度 $u_{\text{rel}}(F_{\text{th}})$

激光诱导损伤阈值标准不确定 $u_{\text{crel}}(F_{\text{th}})$ 被定义为各个相对不确定度的合成标准不确定^[15],表达式为

$$u_{\text{crel}}(F_{\text{th}}) = [u_{\text{crel}}^2(q) + u_{\text{crel}}^2(p) + u_{\text{crel}}^2(L_{\text{th}})]^{1/2}. \quad (10)$$

从式(10)可以进一步看出,若要总的合成不确定度为0,则各相对不确定度分量都为0,但是各相对不确定之间相互独立。通过控制能量区间在5%的范围内,可以将第一项的贡献降为0。因此,总的合成不确定度取决于后两项的大小。根据扩展不确定度公式,计算相对合成的不确定度,表达式为

$$u_{\text{rel}}(F_{\text{th}}) = c u_{\text{crel}}(F_{\text{th}}), \quad (11)$$

式中: c 为置信系数,一般取2~3。当置信水平为0.95时, $c=2$;当置信水平为0.99时, $c=3$ 。计算结果见表3。可见,LIDT分别为 $(13.06 \pm 6.26\%) \text{ J/cm}^2$ (置信水平为0.95)和 $(13.06 \pm 9.39\%) \text{ J/cm}^2$ (置信水平为0.99)。

表 3 线性拟合二维周期性结构薄膜的 LIDT 不确定度计算结果

Table 3 Calculation results of LIDT uncertainties of linear fitting two-dimensional periodic structure thin films

Item	Uncertainty
$u_{\text{crel}}^2(q) / \%$	0
$u_{\text{crel}}^2(L_{\text{th}}) / \%$	0.029
$u_{\text{crel}}^2(L_{\text{th}}) / \%$	0.069
$u_{\text{crel}}(F_{\text{th}}) / \%$	3.13
$c=2, \text{LIDT} / (\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	$13.06 \pm 6.26\%$
$c=3, \text{LIDT} / (\text{J}\cdot\text{cm}^{-2})$	$13.06 \pm 9.39\%$

5 结果与讨论

严格上来讲,影响激光诱导损伤阈值的因素,不仅

与激光通过测试系统中的测试环节及样片的表面清洁程度^[16]有关,还与激光的参数有关,比如激光的输出模式、脉宽^[17-18]、波长^[19-20]及光束质量^[21]。此处,我们拟合激光损伤阈值时,不考虑激光的模式、脉宽及波长引入的损伤阈值误差。根据之前的分析可知,已知光斑的大小和误差,通过能量密度与光斑的数学关系可以计算出该因素不确定度为零的能量误差区间。由于损伤来源相互独立,因此,激光诱导损伤不确定的主要贡献来自于各能量级下的损伤几率不确定度和拟合引入的不确定度。图 3 给出了激光诱导损伤阈值线性拟合结果。根据不确定度的合成公式计算出不确定度分为 6.26% (置信水平 0.95) 和 9.39% (置信水平 0.99)。则该结构化表面光学元件的激光诱导损伤阈值分别为 $(13.06 \pm 0.82) \text{ J/cm}^2$ (置信水平 0.95) 及 $(13.06 \pm 1.23) \text{ J/cm}^2$ (置信水平 0.99)。采用数据统计的方法对激光损伤阈值进行拟合,样本空间大小影响不确定度,因此可以通过提升每一能量级的测量点数进一步逼近真实值。

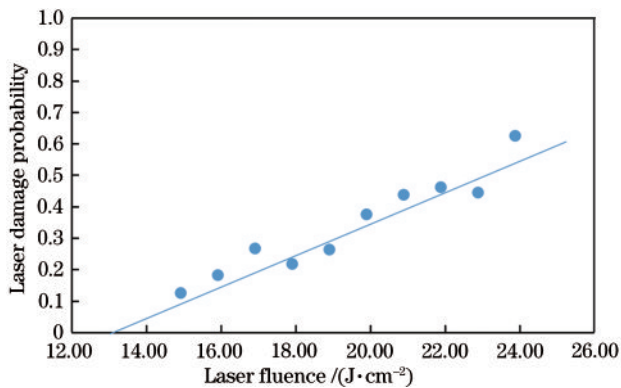


图 3 激光诱导损伤阈值的拟合结果

Fig. 3 Fitting result of laser-induced damage threshold

6 结 论

近年来,人们对微纳结构表面光学元件应用于高功率系统开展了广泛的研究,这类光学元件的激光诱导损伤阈值的准确测定显得尤为关键。光学元件的激光诱导损伤阈值测试系统没有统一化的商业设备,本文根据激光损伤测试标准 ISO21254-2 搭建了测试平台,从原理上分析了损伤测试系统的误差来源和减小 LIDT 不确定度的处理方法,建立了 LIDT 的数据拟合的计算模型,提高了阈值测试结果的可信度。

通过计算建立了光斑误差和激光输出能量误差的关系,即当给定光斑半径为 $400 \mu\text{m}$ 、误差为 $10 \mu\text{m}$ 时,根据能量密度计算公式可以获得能量误差的区间在 5% 以内,从而将能量密度误差降为 0。各误差来源相互独立,因此,激光损伤阈值不确定度的主要贡献是损伤几率不确定度和线性拟合不确定度。本文以周期性表面为例,拟合了样片的 LIDT,计算了损伤阈值的

不确定度,其 LIDT 值分别为 $(13.06 \pm 0.82) \text{ J/cm}^2$ (置信水平 0.95) 和 $(13.06 \pm 1.23) \text{ J/cm}^2$ (置信水平 0.99)。每一级能量实验次数为有限次,因此可以通过增加实验次数来进一步减小拟合结果的不确定度。

参 考 文 献

- [1] 张小民, 胡东霞, 许党朋, 等. 浅论强激光系统的物理受限问题[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201002.
Zhang X M, Hu D X, Xu D P, et al. Physical limitations of high-power, high-energy lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201002.
- [2] Ye X, Jiang X D, Huang J, et al. Subwavelength structures for high power laser antireflection application on fused silica by one-step reactive ion etching[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 78: 48-54.
- [3] Du Y, Wu X, Zhu M P, et al. Theoretical and experimental research on laser-induced damage of cylindrical subwavelength grating[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24296-24307.
- [4] Zhan J X, Wang W, Brauer J H, et al. Spatial and spectral mode mapping of a dielectric nanodot by broadband interferometric homodyne scanning near-field spectroscopy[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(4): 046004.
- [5] Ye X, Huang J, Geng F, et al. High power laser antireflection subwavelength grating on fused silica by colloidal lithography[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(26): 265104.
- [6] Gallais L, Rumpel M, Moeller M, et al. Investigation of laser damage of grating waveguide structures submitted to sub-picosecond pulses[J]. Applied Physics B, 2020, 126(4): 69.
- [7] ISO. Laser and laser-related equipment-determination of laser-induced damage threshold of optical surface-part 1: 1-on-1 test: ISO11254-1-2000[S]. Geneva: ISO, 2000.
- [8] 严荣荣, 苏俊宏, 杨利红. 脉冲激光输出参数对光学薄膜损伤阈值的影响[J]. 光学与光电技术, 2019, 17(2): 34-40.
Yan R R, Su J H, Yang L H. Influence of pulsed laser output parameters on optical film damage threshold[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2019, 17(2): 34-40.
- [9] Du Y, Zhu M P, Liu Q, et al. Laser-induced damage properties of subwavelength antireflective grating on fused silica[J]. Thin Solid Films, 2014, 567: 47-53.
- [10] 史帅凯, 焦宏飞, 马彬, 等. 亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性[J]. 应用光学, 2019, 40(1): 138-142.
Shi S K, Jiao H F, Ma B, et al. Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(1): 138-142.
- [11] Liu F, Jiao H F, Ma B, et al. Influence of the surface and subsurface contaminants on laser-induced damage threshold of anti-reflection sub-wavelength structures working at 1064 nm[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106144.
- [12] Teng Z Q, Sun Y, Kong F Y, et al. Sub-wavelength

- microstructures on lithium triborate surface with high transmittance and laser-induced damage threshold at 1064 nm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107487.
- [13] 徐均琪, 苏俊宏, 葛锦蔓, 等. 光学薄膜激光损伤阈值测量不确定度[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(8): 0806007. Xu J Q, Su J H, Ge J M, et al. Measurement uncertainty of laser-induced damage threshold of the optical thin films[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0806007.
- [14] 国家技术监督局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国计量出版社, 1999. The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1—2012[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1999.
- [15] Hu J P, Wang J, Xin Z, et al. Fluence uncertainties of laser damage threshold measurements[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(1): 016003.
- [16] 李紫荆, 闫莉莉, 左澎, 等. 基于四波混频技术的台式飞秒真空紫外激光光源研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1201007. Li Z J, Yan L L, Zuo P, et al. Development of tabletop femtosecond vacuum ultraviolet laser source based on four-wave mixing techniques[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1201007.
- [17] Lü X M, Pan Y X, Jia Z C, et al. Surface damage induced by a combined millisecond and nanosecond laser [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(17): 5060-5067.
- [18] Wang H, Qi H J, Zhao J L, et al. Transition from isolated submicrometer pits to integral ablation of HfO₂ and SiO₂ films under subpicosecond irradiation[J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 214-222.
- [19] 程海鹏, 耿锋, 刘民才, 等. 光学玻璃基底原子层同质材料沉积薄膜光谱及激光诱导损伤特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(7): 2307-2313. Cheng H P, Geng F, Liu M C, et al. Spectral and laser-induced damage characteristics of atomic layer deposited SiO₂ films on fused silica glass[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(7): 2307-2313.
- [20] Jing X F, Shao J D, Zhang J C, et al. Calculation of femtosecond pulse laser induced damage threshold for broadband antireflective microstructure arrays[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24137-24152.
- [21] Clark C D, Buffington G D. On the probability summation model for laser-damage thresholds[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2016, 21(1): 015006.