

doi: 10.3788/gzxb20164503.0314003

平顶激光束诱导薄膜损伤阈值测量系统

王菲¹, 李玉瑶^{1,2}, 车英¹, 付秀华¹, 田明¹

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130012)

(2 长春理工大学 光电信息学院, 长春 130012)

摘 要: 为了满足快速、精确、定量地测量薄膜激光损伤阈值的要求, 设计了平顶激光束诱导薄膜损伤阈值测量系统. 介绍了损伤阈值测量的原理和方法, 提出二分查找与顺序查找相结合的能量密度查找方式; 根据分光镜的分光比及能量探测器示值求解辐照激光能量, 用 CCD 成像法精密测量了作用在薄膜表面的激光光斑面积; 基于小波变换法, 通过图像处理精确识别了薄膜的损伤; 建立能量密度与损伤几率坐标并进行最小二乘法拟合, 对损伤阈值进行了标定. 对 45° 高反射膜分别进行了高斯光束辐照和平顶光束辐照的测量实验, 结果表明: 高斯光束辐照测量的损伤阈值为 9.95 J/cm², 平顶光束辐照测量的损伤阈值为 13.98 J/cm², 平顶光束诱导比高斯光束诱导的损伤阈值高 40.5%.

关键词: 激光损伤阈值; 薄膜; 高斯光束; 平顶光束; 小波变换; 二分查找

中图分类号: TH741; O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0314003-6

Measurement System of Flattop Laser Induced Damage Threshold to Film

WANG Fei¹, LI Yu-yao^{1,2}, CHE Ying¹, FU Xiu-hua¹, TIAN Ming¹

(1 College of Opto-electronics Engineering Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

(2 College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to measure the laser induced damage threshold to film quickly, accurately, and quantitatively, the measurement system of flattop laser induced damage threshold to film was designed. The principle and method of damage threshold measurement were introduced, and the energy density search method based on the combination of binary search and sequence search was proposed. According to the light splitting ratio of spectroscopy and indicating value of energy detector, the irradiation laser energy was solved, using the CCD imaging method, the laser facula area which irradiated on the film surface was measured precisely. Based on wavelet transformation, the film damage was identified accurately by image processing. The coordinates of energy density and damage probability was established, and fitted by least square method, the laser induced damage threshold was calibrated. Experiments were carried out on 45° reflection films which were irradiated by Gauss beam and flattop beam, the measurement results show that the damage threshold of Gauss beam irradiation was 9.95 J/cm² and the flattop beam irradiation was 13.98 J/cm², the damage threshold irradiation by flattop beam was 40.5% higher than that by Gauss beam.

Key words: Laser induced damage threshold; Film; Gauss beam; Flattop beam; Wavelet transformation; Binary search

OCIS Codes: 140.3330; 120.4640; 310.6860; 140.3300

基金项目: 吉林省科技支撑计划(No. 20150204047GX), 长春市科技发展计划(No. 2014219)和吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(No. 2015578)资助

第一作者: 王菲(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为固体激光技术与激光测试技术. Email: feeewang@163.com

通讯作者: 李玉瑶(1982—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为光学设计与光学仪器. Email: liyuyao1983@163.com

收稿日期: 2015-09-24; 录用日期: 2015-12-14

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

长期以来,强激光对光学薄膜的损伤一直是制约激光向高功率、高能量发展的瓶颈,也是影响高功率激光薄膜元件稳定性、可靠性和使用寿命的主要因素^[1-2].激光对薄膜的损伤是一个极其复杂的过程,导致薄膜激光损伤阈值的定量测试结果具有不确定性,采用不同测量装置测量的结果存在较大的差异,因此,准确、高效地测量薄膜激光损伤阈值对于研究薄膜损伤的机理和制备高损伤阈值的光学薄膜具有重要意义^[3-6].

目前,国内外对薄膜损伤的研究,主要采用未经整形的高斯分布激光束辐照薄膜表面,由于其中心光强较高,边缘相对较弱,光斑中心位置易导致薄膜的损伤,在损伤阈值附近薄膜的损伤面积小于辐照激光光斑面积,而在进行辐照能量密度计算时假定辐照光强是均匀的,因此测量的损伤阈值比实际的阈值偏小,测量偏差较大^[7-8].在损伤阈值附近,高斯光束辐照造成的薄膜的细微尺寸损伤,要小于平顶光束辐照造成的损伤尺寸,这对损伤判识系统分辨率提出了更高的要求.在高斯光束光斑中心部位一个图像细分单元内对能量进行平均来等效最大辐照强度,引入一个较小的误差,进而获得等效光斑面积^[9],这一等效光斑面积对获得辐照强度参量没有实际意义.

通常,测量时采用顺序递增的方式查找辐照激光能量密度,测量时选择初始能量密度,在该能量密度基础上以一定的步长递增测量,记录每个能量密度值测量时所对应的损伤几率,这种方法简单方便,但测量效率低^[10].

在损伤薄膜的判识方面,常用的有相衬显微法、等离子体闪光法、散射光强法、光热偏转法、六角相位光栅法和透射反射扫描法等,但各种方法均存在其应用的局限性,如相衬显微法对不明显的损伤无法实现准确判识^[11];等离子体闪光法比较粗糙,且主观性太强;散射光强法对基底的光洁度要求较高^[12];光热偏转法对测试的环境要求高,实验装置复杂^[13];六角相位光栅法对光栅尺寸和刻蚀密度的要求较高^[14];透射反射扫描法测量结果不够可靠^[15].

针对上述问题,基于非球面光束整形原理^[16-17],本文提出了一种基于平顶激光束诱导损伤的薄膜激光损伤阈值高准确度测量方法,采用平顶激光束进行损伤测试,其造成的薄膜损伤面积不再是微小尺寸,而是远大于高斯光束光斑造成的损伤尺寸,降低了对损伤判识系统分辨率的要求.

1 损伤阈值的测量原理及方法

1.1 测量原理

薄膜的激光损伤阈值是指薄膜发生临界损伤时,

辐照激光束的能量密度,而能量密度表示单位面积所包含的能量.因此,损伤阈值的测量需要先计算辐照激光束的能量 Q 和作用在薄膜表面的光斑面积 S ,激光能量密度为

$$F = \frac{Q}{S} \quad (1)$$

薄膜激光损伤阈值测量的基本原理如图 1,激光器输出的激光能量经聚焦光学系统使光束会聚,再经分光镜使一部分能量辐照在被测薄膜表面,另一部分传输到光束诊断系统,对薄膜表面激光能量和光斑面积进行测量.

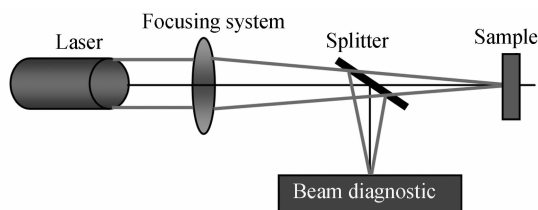


图 1 损伤阈值测量原理

Fig. 1 Principle diagram of the damage threshold measurement

1.2 测量方法

由于薄膜抗激光损伤阈值与薄膜本身的性质和激光器的输出特性有关,损伤的过程非常复杂.因此,薄膜激光损伤阈值通常以损伤几率来表示,直接精确测量激光的损伤阈值非常困难,目前,薄膜激光损伤阈值的确定均采用概率的方式^[18].具体方法为:采用 1-on-1 测量方式,由同一激光脉冲能量辐照薄膜表面上的多个点,得到损伤的次数,计算该能量密度下的损伤几率;改变辐照能量密度,再测出损伤几率,得出不同能量密度对应的损伤几率,建立能量密度与非 0%、非 100% 的所有损伤几率的坐标系,并对这些点进行最小二乘法拟合,拟合后的曲线与能量坐标轴的交点即为零几率损伤阈值,如图 2.

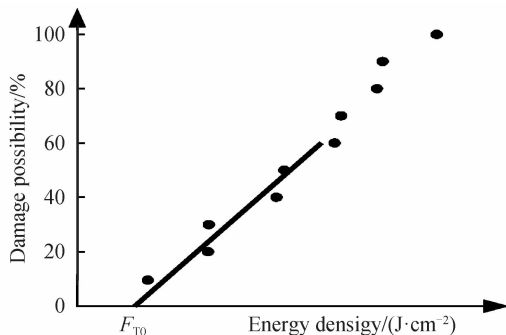


图 2 零几率损伤阈值拟合示意图

Fig. 2 Fitting diagram of zero probability damage threshold

1.3 能量密度的查找方式

辐照薄膜表面的能量密度查找方式决定了损伤阈值测量的效率.常用的顺序查找是逐个进行查找,对 n 个元素而言,最快的查找次数为 1,最差的查找次数为

n , 查找成功的平均查找长度为 $(n+1)/2$, 而二分查找的平均查找长度为 $\log_2 n + 1$, 可见二分查找方式的效率要高于顺序查找方式。

本文提出了二分法与顺序法相结合的查找方式, 通过二分查找的方法找到损伤几率非 0% 非 100% 所对应的能量密度, 然后在此基础上将能量密度顺序递增测量, 直到损伤几率为 100%, 再在此基础上顺序递减测量, 直到损伤几率为 0%, 其流程如图 3。

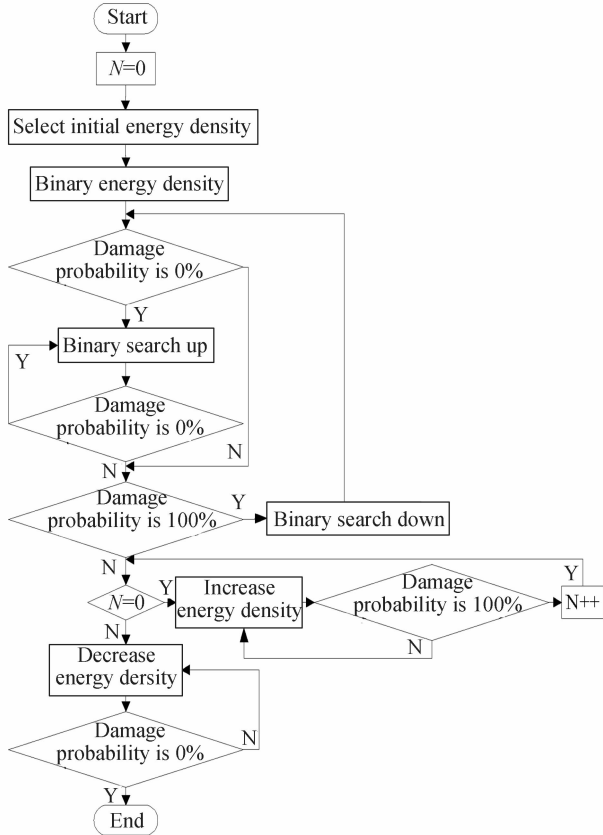


图 3 能量密度查找流程

Fig. 3 Flow chart of energy density searching

2 测量与评价系统

2.1 系统的组成

薄膜抗激光损伤阈值测量装置示意如图 4, 电光调 Q 激光器输出的激光脉冲通过法拉第旋光器对能量进行精密调节, 未经整形的激光能量服从高斯分布, 经光束整形光学系统后变换为平顶光束。激光脉冲经聚焦光学系统后被分光镜 A 以一定的分光比分成样品辐照和能量密度标定两路光。在样品辐照光路中, 激光束被分光镜 A 反射到被测样品表面进行辐照, 运动工作台带动被测样品移动实现不同测试点的测量, 同时, 被测样品表面通过数码显微系统将损伤表面成像到 CCD 相机 A, 通过 CCD 相机 A 对样品表面损伤与否进行判断。在能量密度标定光路中, 激光束经分光镜 B 被分成两路, 反射部分被能量探测器接收, 透射部分经过衰减后被 CCD 相机 B 接收。CCD 相机 B 探测面位置与被测

样品表面位置等效, 通过 CCD 相机 B 采集光斑大小, 从而计算出辐照到被测样品表面的光斑面积。根据辐照到被测样品表面的激光脉冲能量和光斑面积来获得被测样品表面的辐照能量密度。根据分光镜 A 和 B 的分光比例, 以及能量探测器的示值可以计算出辐照到被测样品表面的激光脉冲能量密度。利用损伤判识系统来获得不同辐照能量密度下样品的损伤几率, 通过最小二乘拟合方法拟合最终获得样品的激光损伤阈值。

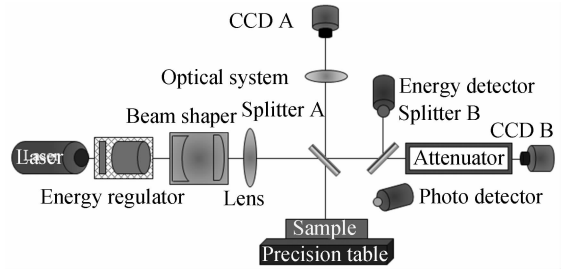


图 4 薄膜抗激光损伤阈值测量装置

Fig. 4 Schematic of apparatus for laser induced damage threshold measurement

为了准确测量薄膜激光损伤阈值, 基于光束整形理论, 采用光学设计软件 ZEMAX 设计了基于非球面的平顶光束整形光学系统, 其输入光束与输出光束的强度 X 面剖面图如图 5, 扩束倍率为 $2\times$, 能量转换效率为 95.33%, 平顶度为 93.66%。

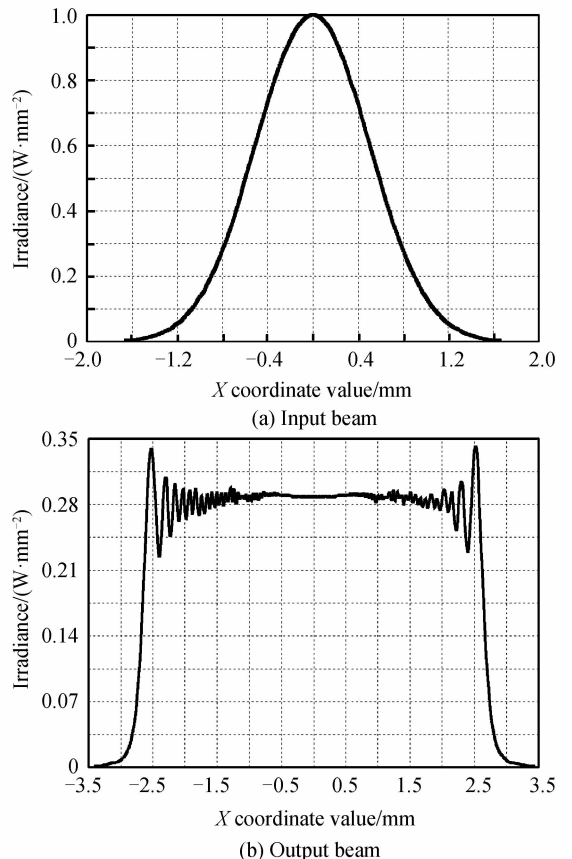


图 5 光束强度 X 面剖面

Fig. 5 X-cross of beam irradiance

2.2 损伤的判识

准确地判识薄膜激光损伤是精确测量损伤阈值的前提条件,为了实现薄膜损伤的在线自动判识,同时提高判识的精确度,应用数字图像处理方法,结合小波变换与图像识别技术实现损伤的高准确度判识。

将激光辐照前的图像作为背景图像,辐照后的图像作为待判识图像,采用小波变换法将背景图像和待判识图像分解为近似分量和细节分量,在一定尺度下对近似分量的二值化图像进行互相关运算,通过相关系数与设定的系数阈值比较来判识薄膜是否发生损伤,如图6。

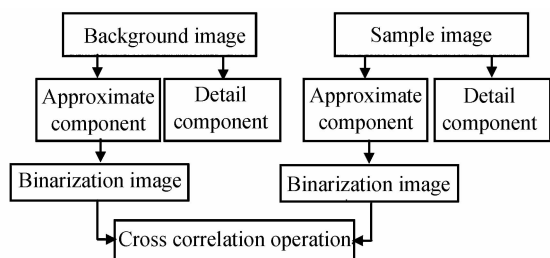


图6 损伤判识原理

Fig. 6 Diagram of damage identification principle

假设 $\{V_j\}$ 是一个给定的多分辨率分析, $\varphi(x)$ 和 $\psi(x)$ 分别为尺度函数和小波函数,初始信号 $i(x)$ 在尺度 j 上可以近似表示为

$$i(x) \approx A_j i(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_{j,k} \varphi_{j,k}(x) = I_{j-1} i(x) + D_{j-1} i(x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C_{j-1,m} \varphi_{j-1,k}(x) + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} D_{j-1,m} \psi_{j-1,k}(x) \quad (2)$$

式中, $C_{j,k}$ 为分解系数, $I_{j-1} i(x)$ 表示在第 $j-1$ 尺度上对信号的近似, $D_{j-1} i(x)$ 表示信号在第 $j-1$ 尺度上的细节分量.利用小波变换对图像分解的同时也实现了对图像的空间滤波。

根据Vander-Lugt相关识别的原理对损伤图像进行相关识别,设输入图像近似分量信号是 $I(x,y)$,其频谱为

$$I(f_x, f_y) = F\{I(x,y)\} = \iint_{-\infty}^{+\infty} I(x,y) \cdot \exp[-j2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (3)$$

式中 $F\{\ast\}$ 是傅里叶变换算符, $I^*(f_x, f_y)$ 是 $I(f_x, f_y)$ 的共轭.待识别图像为 $f(x,y)$,其频谱为

$$F(f_x, f_y) = F\{f(x,y)\} \quad (4)$$

经过相关运算得到输出图像为

$$P(x,y) = F^{-1}\{F(f_x, f_y) I^*(f_x, f_y)\} \quad (5)$$

式中, $F^{-1}\{\ast\}$ 是傅里叶逆变换算符。

通过比较相关输出的相关峰能量最大值可以明显地识别损伤图像.图像的相似程度可以用相关系数 H 来度量,其定义为

$$H = \frac{\sum_y \sum_x i(x,y) f(x,y)}{\sqrt{\sum_y \sum_x i^2(x,y)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum_y \sum_x f^2(x,y)}}} \quad (6)$$

当 $H=1$ 时,两图像完全一致.实际识别中,由于误差和噪声的存在,实际计算的 H 值有可能与理论值不一致.在实际应用中,通过实验确定一个比较阈值,小于阈值的图像即判定损伤,否则未发生损伤。

3 实验

测量系统样机如图7,采用波长为1064 nm的Nd:YAG激光器,其脉冲宽度为12 ns,脉冲频率为10 Hz,单脉冲能量为120 mJ.分光镜A、B的分光比(透射光能量与反射光能量比值 $T:R$)分别为1:5和1:99.被测样品为以K9玻璃为基底,以 HfO_2 和 SiO_2 作为高、低折射率的材料,针对1064 nm波长,采用电子束蒸发方法镀制的 45° 高反射薄膜,样品直径为25.4 mm。

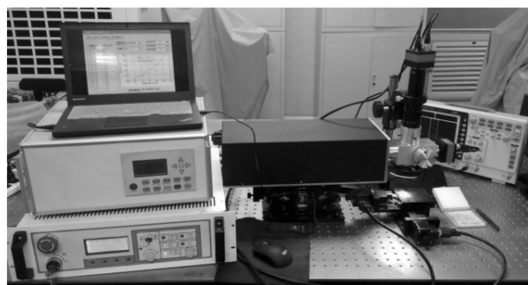


图7 薄膜激光损伤阈值测量系统实验装置

Fig. 7 Experiment setup of laser induced damage threshold to film

采用1-on-1测量方式对样品进行单脉冲垂直入射辐照测量,每个脉冲能量辐照20个测试点,测试点的间距为2 mm,通过控制样品工作台平移实现测试点的移动。

3.1 高斯光束辐照测量

未经整形的激光束其光场服从高斯分布,因此光

表1 高斯光束辐照测量数据

Table 1 Measurement data of Gauss beam radiation

Number	Energy density/(J · cm ⁻²)	Damage probability/(%)
1	1.70	0
2	72.54	100
3	37.08	100
4*	19.55	85
5*	20.50	95
6*	18.61	80
7*	17.43	70
8*	16.36	50
9*	15.27	45
10*	14.29	35
11*	13.12	25
12*	12.04	15
13*	11.40	15
14*	10.72	5
15	9.96	0

注: * 为拟合可用数据

斑面积的测量需要在与被测样品表面等效的位置测得高斯光束峰值强度的 $1/e^2$ 处光斑,有效直径为 $695\ \mu\text{m}$,计算得到光斑面积为 $3.79 \times 10^{-3}\ \text{cm}^2$,然后计算出每次辐照的激光能量密度及其对应的损伤几率,结果见表1.

根据表1中的数据,采用损伤阈值标定软件对测量结果进行拟合计算,结果如图8,损伤阈值为 $9.95\ \text{J}/\text{cm}^2$.

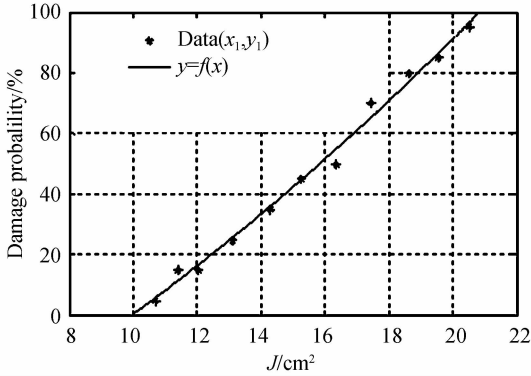


图8 高斯光束辐照测量结果

Fig. 8 Measurement result of Gauss beam irradiation

3.2 平顶光束辐照测量

由于激光束经整形后光场不再服从高斯分布,而是近似服从均匀分布,因此将 CCD 相机的探测面调节到与被测样品表面等效的位置,测得辐照在薄膜表面的光斑直径为 $730\ \mu\text{m}$,计算得到光斑面积为 $4.24 \times 10^{-3}\ \text{cm}^2$,然后计算出本次辐照的激光能量密度及其对应的损伤几率,见表2.

表2 平顶光束辐照测量数据

Table 2 Measurement data of flattop beam radiation

Number	Energy density/ $(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	Damage probability/ $(\%)$
1	1.34	0
2	82.96	100
3	42.20	100
4 *	27.33	95
5 *	25.94	80
6 *	25.05	80
7 *	23.68	70
8 *	22.40	60
9 *	20.11	55
10 *	18.86	45
11 *	17.32	30
12 *	16.60	10
13 *	15.13	10
14 *	14.27	5
15	13.42	0

注: * 为拟合可用数据

根据表2中的数据,采用损伤阈值标定软件对测量结果进行拟合计算,结果如图9,损伤阈值为 $13.98\ \text{J}/\text{cm}^2$.

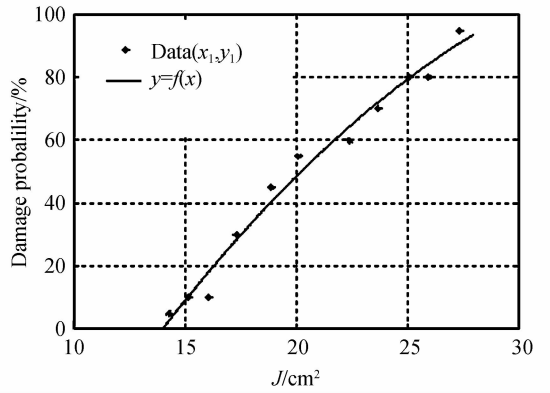


图9 平顶光束辐照测量结果

Fig. 9 Measurement result of flattop beam irradiation

3.3 测量结果对比分析

为了观察损伤薄膜的微观形貌,采用工具显微镜在放大倍率为 $50\times$ 时对损伤形貌进行观测.高斯光束辐照测量能量密度为 $37.08\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,判定损伤的典型形貌如图10(a);平顶光束辐照测量能量密度为 $20.11\ \text{J}/\text{cm}^2$ 时,判定损伤的典型形貌如图10(b).图10(a)的损伤区域内,中心部分损伤相对严重,损伤程度逐渐向边缘减轻,这是由于高斯光束中心能量较高,且能量向边缘逐渐降低;图10(b)中损伤区域的损伤程度相对比较均匀,这是由于平顶光束的光场分布近似均匀.

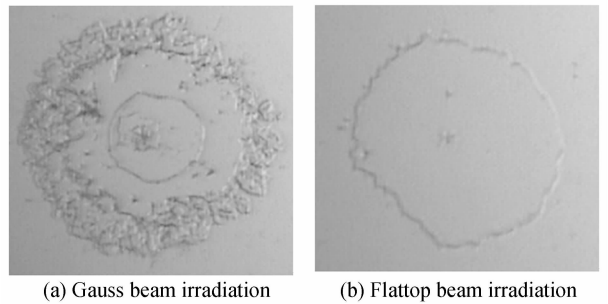


图10 薄膜损伤形貌

Fig. 10 Damage morphology of film

采用高斯光束辐照测量得到的损伤阈值为 $9.95\ \text{J}/\text{cm}^2$,采用平顶光束辐照测量得到的损伤阈值为 $13.98\ \text{J}/\text{cm}^2$,计算得到平顶光束诱导损伤阈值比高斯光束诱导损伤阈值提高了 40.5% .

4 结论

本文提出的薄膜激光损伤阈值测量系统基于均匀分布的平顶激光束辐照样品表面,采用磁致旋光器件对激光能量进行精密调节,采用 CCD 成像法对样品表面等效位置处光斑进行精密测量,采用小波变换图像处理技术实现了薄膜损伤的精确判识,结合二分查找与顺序查找法对临界辐照能量密度进行测试标定,根据薄膜损伤概率,借助最小二乘曲线拟合法获得薄膜

的激光损伤阈值. 该测试方法缩短了损伤阈值测试时间, 提高了损伤测试的效率. 应用该测量系统, 在 1 064 nm 波长下, 对 45° 高反射薄膜进行了 1-on-1 方式测量, 采用平顶光束辐照测量的损伤阈值比高斯光束辐照测量的损伤阈值高 40.5%.

参考文献

- [1] HUANG Cai-hua, XU Yi-yu, XIA Zhi-lin, *et al.* Mechanism of laser-induced damage in optical dielectric films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3):532-535.
- [2] DETLEV R, MARCO J, KAI S. Laser damage thresholds of optical coatings[J]. *Thin Solid Films*, 2009, **518**(5): 1607-1613.
- [3] BONNEAU F, COMBIS P, RULLIER J, *et al.* Study of UV laser interaction with gold nanoparticle embedded in silica[J]. *Applied Physics B*, 2002, **75**(2): 803-815.
- [4] ZHOU Qiong, ZHANG Zhi-xiang, SUN Ming-ying, *et al.* Using amplified spontaneous emission source to test damage threshold of optical thin-film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(8): 0814003.
周琼, 张志祥, 孙明营, 等. 采用放大的自发辐射光源测试光学薄膜的损伤阈值[J]. *光学学报*, 2014, **34**(8): 0814003.
- [5] XU Kai, LU Yuan, LING Yong-shun, *et al.* Finite element analysis of temperature rising in VO₂ thin films under irradiation of pulse laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0531003.
徐凯, 路远, 凌永顺, 等. 脉冲激光辐照下 VO₂ 薄膜温升的有限元分析[J]. *光子学报*, 2015, **44**(5): 0531003.
- [6] KATSUHIRO M, SHINJI M, TOSHIHIRO S, *et al.* Temperature dependence of laser-induced damage threshold of optical coatings at different pulse widths[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(23): 28719-28728.
- [7] YANG Li-hong, WANG Tao, SU Jun-hong, *et al.* Influence of laser conditioning on the damage properties of HfO₂ thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(12): 1231001.
杨利红, 王涛, 苏俊宏, 等. 激光预处理对 HfO₂ 薄膜损伤特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, **33**(12): 1231001.
- [8] LAURENT G, MIREILLE C. Laser-induced damage thresholds of bulk and coating optical materials at 1030nm, 500fs[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(4): 186-196.
- [9] LAURENT G, JEAN Y N. Optimized metrology for laser-damage measurement: application to multiparameter study[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(6): 960-971.
- [10] ZHU Yao-nan. Discussion of the measurement methods for laser induced damage threshold of optical coating[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(5): 532-535.
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.
- [11] XIA Zhi-lin, GUO Pei-tao, XUE Yi-yu, *et al.* Investigation of the plasma bursting process in short pulsed laser induced film damage[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(5): 3523-3530.
夏志林, 郭培涛, 薛亦渝, 等. 短脉冲激光诱导薄膜损伤的等离子体爆炸过程分析[J]. *物理学报*, 2010, **59**(5): 3523-3530.
- [12] SU Jun-hong, LIANG Hai-feng, XU Jun-qi. Evaluation criteria of laser-induced damage threshold based on light scattering[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2010, **30**(3): 325-328.
苏俊宏, 梁海峰, 徐均琪. 激光损伤的光散射法判别研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2010, **30**(3): 325-328.
- [13] ANNE LISE D. Integrated photothermal microscope and laser damage test facility for in-situ investigation of nanodefected induced damage[J]. *Optics Express*, 2003, **20**: 2497-2501.
- [14] CHRISTOPH S, FRANK L, JURG E B, *et al.* Talbot array illuminator for single-shot measurements of laser-induced-damage thresholds of thin-film coatings[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(10): 1493-1499.
- [15] GAN Rong-bing, LIN Li-bin, JIANG Xiao-dong, *et al.* Determinant of laser-induced damage of thin film by the scan of transmission and reflectance[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1): 45-48.
甘荣兵, 林理彬, 将晓东, 等. 用透射反射扫描法检测光学薄膜的激光损伤[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1): 45-48.
- [16] LI Yu-yao, WANG Fei, CHE Ying. Design of optical system for flattop beam shaper based on the measurement of laser induced damage threshold of thin films[J]. *Optik*, 2014, **125**: 4143-4145.
- [17] SHI Guang-yuan, YANG Xiao-ping, LIANG Yan-mei. Gaussian beam shaping based on aspheric cylindrical lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 0122001.
史光远, 杨晓苹, 梁艳梅. 基于非球面柱透镜的激光束整形[J]. *光子学报*, 2014, **43**(1): 0122001.
- [18] LIU Qiang, LIN Li-bin, GAN Rong-bing, *et al.* Investigation on zero probability damage threshold of high-reflective thin films[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6): 538-542.
刘强, 林理彬, 甘荣兵, 等. 高反射膜激光零几率损伤阈值的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(6): 538-542.