

激光薄膜损伤中等离子体冲击波特征

苏俊宏^{1,2} 吕宁^{1*} 葛锦蔓²

¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

²南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 在不同位置和激光辐照能量的条件下, 采用传声器采集并提取了等离子体冲击波的压强值及其起始时间信息, 分析了等离子体冲击波在空气中的传播规律, 拟合得到了冲击波声压值与激光辐照能量的关系函数。结果表明, 激光等离子体冲击波以球面波形式在空气中进行传播, 其声压值与激光辐照能量呈非线性的正相关关系。

关键词 薄膜; 激光损伤; 激光诱导击穿; 等离子体冲击波; 声谱分析

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.1203003

Characteristics of Plasma Shock Waves in Laser-Induced Film Damage

Su Junhong^{1,2} Lü Ning¹ Ge Jinman²

¹School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

²School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Under different laser irradiation energies and positions, the pressure value and onset time of laser plasma shock waves are collected and extracted with test microphones, the propagation law of plasma shock waves in air is analyzed, and the relation function between sound pressure value of shock waves and laser irradiation energy is fitted. The results indicate that laser plasma shock waves propagate in the forms of spherical waves and the relationship between their sound pressure values and laser irradiation energy is nonlinear and positive.

Key words thin films; laser damage; laser-induced breakdown; plasma shock wave; sound spectrum analysis

OCIS codes 310.6870; 140.3330; 140.3440

1 引言

光学薄膜元器件在各个领域有着广泛的应用^[1-3]。然而,随着光学系统功率的增大,光学薄膜成为了光学元件损伤的薄弱环节。一旦光学薄膜受到损伤,整个光学系统的性能就会大大降低,甚至瘫痪^[4],因此研究薄膜的激光损伤显得尤为重要。

目前,薄膜激光损伤的研究主要包括损伤机理研究和损伤阈值研究两大方面。研究表明,激光等离子体冲击波造成的薄膜损伤效应是薄膜损伤的重要因素。所以有必要对激光薄膜损伤中的等离子体冲击波特征进行系统研究,以提高薄膜抗激光损伤性能,增强光学系统的稳定性。

本文以单层 HfO₂ 薄膜为例,搭建了薄膜损伤等离子体冲击波实验测试平台,采集了薄膜损伤时的等离子体冲击波特征参数,研究了其传播规律及冲击波压强与激光能量间的函数关系,探讨了研究结果在激光薄膜损伤阈值研究中的应用。

收稿日期: 2016-08-15; **收到修改稿日期:** 2016-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61378050,61205155)、科技部国际科技合作项目(2013DFR70620)

作者简介: 苏俊宏(1963—),男,博士,教授,主要从事薄膜激光损伤及干涉测量方面的研究。

E-mail: sujunhong@xatu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: lvning90821109@sina.com

2 实验原理

一般认为,激光等离子体的膨胀会产生等离子体冲击波。在激光辐照薄膜样片时,薄膜对激光的吸收主要表现为温度升高、薄膜的物相发生变化^[5]。按照时间顺序,可将薄膜状态的改变过程分为三个阶段^[6]: 1) 传热阶段; 2) 气化阶段; 3) 蒸汽强烈吸收、电离、爆破,形成等离子体冲击波阶段。该冲击波的强度在传播初期衰减很快,与作用点之间的距离达到厘米数量级后,传播速度衰减至声速^[7]。

图 1 为实验装置图。激光器为基模(TEM₀₀)Nd:YAG 调 Q 激光器(输出波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns),输出的光束能量经衰减系统衰减后,由透镜聚焦到样品表面,采用刀口法测得辐照在薄膜样片上的光斑有效直径为 0.4 mm。测试样品放置于一个步进电机驱动的二维平移台上,激光器的单次脉冲能量经三组共 15 个衰减片组成的衰减系统衰减后,用能量计实时测量辐照的激光能量。根据国际标准 ISO 21254 测试规范,采用一对一的方式对样品进行辐照,利用直径为 1/2 英寸(1.27 cm)的驻极体传声器(灵敏度 11.7 mV/Pa,频率响应范围 6.3~4×10⁴ Hz)对样品辐照后产生的等离子体冲击波参数进行采集。

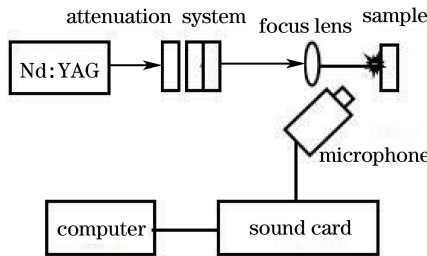


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

3 实验及讨论

3.1 等离子体冲击波在空气中的传播规律

图 2 为激光薄膜损伤阈值测试实验装置图。将样片(单层 HfO₂ 薄膜,膜厚为 $\lambda/4$, $\lambda=1064$ nm)夹持于样品夹上,卡入二维平移台,样片表面与激光辐照光路垂直。将传声器分别置于激光辐照作用点的水平方向和垂直方向,传声器与样品表面分别呈 0°、15°、30°、45°和 60°夹角,在不同的夹角下,传声器与激光辐照作用点间距离分别为 10, 20, 30, 40, 50, 60 cm,激光辐照能量为 50 mJ。以相同的激光能量辐照,采用一对一的辐照方式辐照样片 8 次,传声器在相同位置采集冲击波信号。选用日本 Tascam 公司的 US-122L 型声卡,采集软件使用 Cool Edit,采用单声道采集,采样频率为 16 kHz,采样精度为 16 bit, 储存格式为 wav 格式。

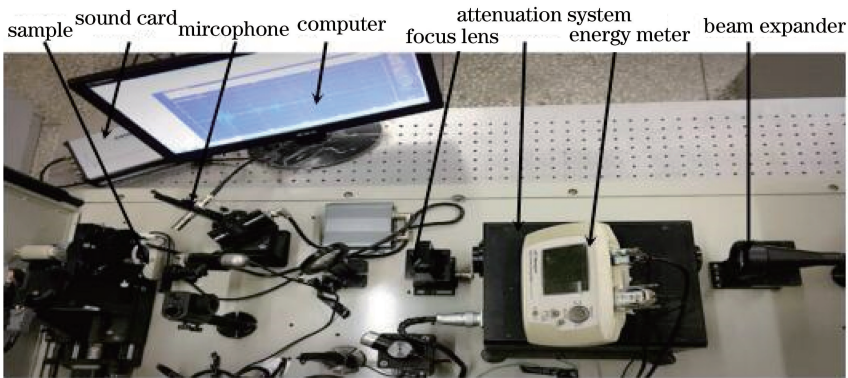


图 2 激光薄膜损伤阈值测试实验装置图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for testing laser-induced film damage thresholds

在水平方向上,等离子体冲击波的传播距离(传声器与激光辐照点间的距离)、角度(传声器和激光辐照点的连线与样品表面之间的夹角)与其声压相对强度值之间的关系如图 3 所示。可以看出,等离子体冲击波在不同角度方向上的强度衰减大致相同,只有当夹角为 0°时,其强度值显著偏低。这是因为样品夹持器在

激光与传声器之间,影响了等离子体冲击波在空气中的传播,致使采集到的声音信号强度降低。

在垂直方向上,等离子体冲击波的传播距离、角度与其强度值之间的关系如图 4 所示。可以看出,等离子体冲击波在不同角度方向上的强度衰减大致相同,但衰减幅度与传播距离具有明显相关性。

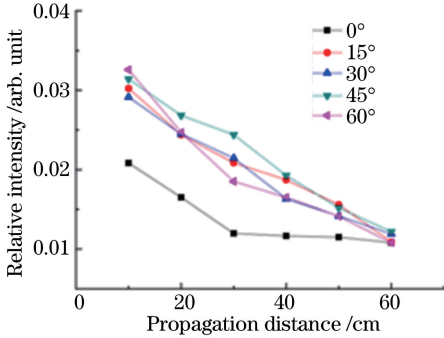


图 3 水平方向上等离子体冲击波的声压相对强度值与传播距离的关系

Fig. 3 Relationship between relative intensity of sound pressure and propagation distance of plasma shock waves in horizontal direction

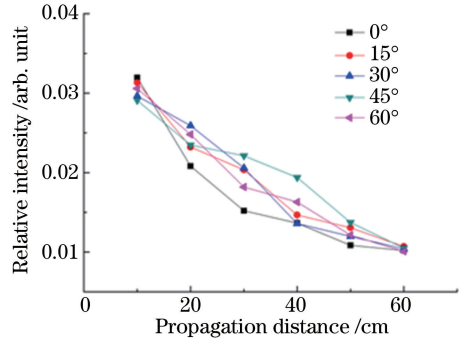


图 4 垂直方向上等离子体冲击波的声压相对强度值与传播距离的关系

Fig. 4 Relationship between relative intensity of sound pressure and propagation distance of plasma shock waves in vertical direction

综合图 3,4 可以看出,等离子体冲击波在空气中以近似球面波形式传播,且其强度随着传播距离的增大而迅速衰减。

3.2 等离子体冲击波马赫数在空气中的衰减规律

等离子体冲击波的马赫数是表征等离子体冲击波的重要特征参数之一,其大小直接反映了等离子体冲击波的强弱:

$$Ma_p = \frac{1}{5} \sqrt{\epsilon r^3} + \frac{1}{5} \sqrt{\epsilon r^3 + 25}, \quad (1)$$

式中 Ma_p 为等离子体冲击波的马赫数; $\epsilon = E/(\gamma p_0)$; r 为冲击波面距激光辐照点的距离; γ 为介质绝热系数; $E = TE_0$, T 为常数, E_0 为激光器的能量密度; p_0 为介质未扰动时的压强。

由(1)式可模拟出,当激光辐照能量为 100,80,60,40,20 mJ 时,对应的等离子体冲击波马赫数在空气中的衰减规律,如图 5 所示。

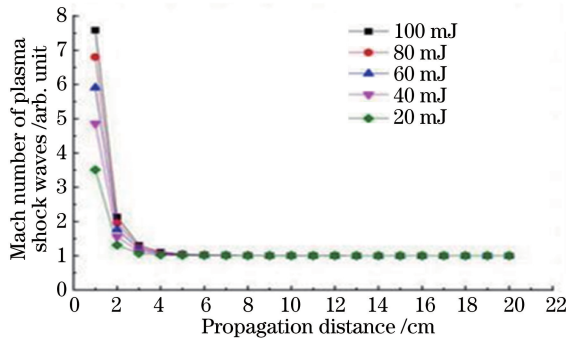


图 5 不同激光辐照能量下空气中等离子体冲击波马赫数的衰减图

Fig. 5 Attenuation diagrams of Mach number of plasma shock waves in air under different laser irradiation energies

从图 5 可以看出,当等离子体冲击波传播到距离激光辐照点 3 cm 处时,其马赫数接近 1,即衰减为声速。

由于激光辐照点的尺寸远小于传声器探头的尺寸,当激光辐照点与传声器探头相距小于 1 cm 时,传声器有可能遮挡住辐照激光从而影响到达辐照点的能量,造成等离子体冲击波的强度小于预计值,所以传声器不能离激光辐照点太近。分别在离激光辐照点 3,5,10,15,25,40,60 cm 处放置传声器采集信号,激光器输出能量设为 80 mJ,采用一对一方式进行辐照。

当激光器触发时,先输出一个 5 V 的脉冲信号,同时示波器开始采样。假设激光器触发信号的输出与激

光器触发之间的时间间隔恒定,便可以通过提取等离子体冲击波起始位置处的采样点的位置编号与示波器的采样频率来确定等离子体冲击波到达传声器的时间。实验所用示波器的采样频率选取为 2.5 MHz,测量结果如表 1 所示。

表 1 等离子体冲击波马赫数在空气中的衰减实测结果

Table 1 Attenuation test results of Mach number of plasma shock waves in air

Relative time /ms	Propagation distance /cm	Average velocity /($m \cdot s^{-1}$)	Mach number /arb. unit
1.134	3		
1.187	5	375.940	1.106
1.245	10	347.222	1.021
1.388	15	349.162	1.027
1.537	25	335.121	0.986
1.840	40	330.251	0.971
2.286	60	336.323	0.989

从表中可以看出,实测的等离子体冲击波的马赫数与(1)式计算结果基本一致,考虑到激光器触发信号的输出与激光器触发的时间间隔有一定误差,以及薄膜表面并非完全一致,可以认为实验是可信的。

3.3 等离子体冲击波声压强度值与激光辐照能量间的关系

实验选取的激光能量范围为 10~75 mJ,能量阶为 5 mJ,共 14 个能量值。传声器放置在与激光辐照点水平距离为 10 cm 处,传声器与薄膜样片表面夹角为 30°。样片选用单层 HfO₂ 薄膜,膜厚为 $\lambda/4$, $\lambda=1064$ nm。采用一对一方式辐照样片,相同能量下辐照 10 次。

在激光辐照样片时,采集声音信号。使用 Dasp 声学测试软件接收并存储信号,该软件可以直接读取声音信号的最大声压值,单位为 Pa。由于激光器能量输出值与设定值之间有 $\pm 2\%$ 的误差,因此激光器具体的输出能量以实测为准,即相同情况下 10 次辐照实测能量的平均值。不同能量值对应测得的声压值如表 2 所示。

表 2 不同激光辐照能量下采集到的声压值

Table 2 Sound pressure values under different laser irradiation energies

Laser irradiation energy /mJ	0	14.088	18.525	24.481	28.359	34.518	38.496
Sound pressure /Pa	0	7.400	10.130	34.728	30.480	61.888	83.960
Laser irradiation energy /mJ	44.400	48.526	53.845	59.410	61.941	67.130	68.572
Sound pressure /Pa	141.517	141.032	218.768	241.204	315.890	345.086	340.573

将表 2 中激光辐照能量值和对应的采集到的声压值拟合成二次曲线,如图 6 所示。

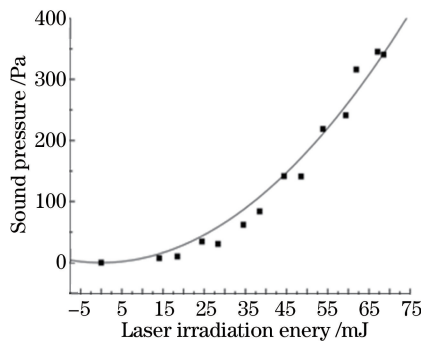


图 6 激光辐照能量-声压拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of laser irradiation energy versus sound pressure

当激光辐照能量为 0 时,采集到的声压必定为 0,该曲线一定经过点(0,0),因此将实验所采用的能量最小值设为 0。众所周知,随着激光辐照能量的增大,采集到的声压也会随之增大,因此该二次曲线沿横轴正方向单调递增,即该二次曲线的对称轴不在 x 正轴。考虑以上条件,对能量和声压进行曲线拟合,拟合函数为

$$F(x) = 0.07282x^2, \quad (2)$$

式中 x 为激光辐照能量值, F 为冲击波声压值,置信度为 95%。由(2)式可知,等离子体冲击波的声压值与激光辐照能量值呈非线性的正相关关系。

以国标法测得的激光薄膜损伤阈值为 7.84 J/cm^2 , 对应的激光辐照能量为 9.83 mJ , 代入(2)式可得等离子体冲击波声压值为 7.04 Pa 。在 100 倍放大显微镜下, 当观察到薄膜损伤时, 采集到的声压最小值为 6.73 Pa , 而薄膜未损伤时采集到的声压最大值为 7.56 Pa 。取以上两个值的均值 7.18 Pa 为薄膜损伤的临界等离子体声压值。该值与拟合曲线计算得到的 7.04 Pa 基本一致。由此可以看出, 等离子体冲击波的声压值也可以对薄膜的损伤阈值进行表征。

4 结 论

以单层 HfO_2 薄膜样片为例, 利用高功率 Nd:YAG 固体激光器对其进行辐照, 产生了等离子体冲击波。利用驻极体传声器进行采集, 对采集到的等离子体冲击波的强度及起始时间进行了分析讨论。

实验表明, 激光辐照薄膜样片后, 产生了等离子体冲击波, 其在空气中以近似球面波的形式传播, 而且传播速度衰减很快。当等离子体冲击波的传输距离达到厘米量级时, 其传播速度衰减为声速。激光辐照能量和等离子体冲击波声压的拟合曲线显示二者呈非线性正相关关系, 且等离子体冲击波声压值可以表征薄膜的损伤阈值, 这为薄膜损伤判别标准的研究提供了新的方向。

参 考 文 献

- 1 Hirao K, Miura K. Writing waveguides and gratings in silica and related materials by a femtosecond laser[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998, 239(1-3): 91-95.
- 2 Miura K, Qiu J, Inouye H, *et al.* Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(71): 3329-3331.
- 3 Kozlowski M R, Thomas I M, Campbell J H, *et al.* High-power optical coatings for a megajoule-class ICF laser[C]. SPIE, 1993, 1782: 105-119.
- 4 Ristau D, Jupé M, Kai S. Laser damage thresholds of optical coatings[J]. Thin Solid Films, 2009, 518(5): 1607-1613.
- 5 Zou Biao, Lu Kebin, Yang Shengwu, *et al.* Laser plasma acoustic wave and the application [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 1999, 10(5): 484-486.
邹 彪, 陆克斌, 杨生武, 等. 激光等离子体声波及应用[J]. 光电子 • 激光, 1999, 10(5): 484-486.
- 6 Zou Biao, Chen Jianping, Shen Zhonghua, *et al.* Mechanism of laser induced plasma acoustic wave [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(2): 212-216.
邹 彪, 陈建平, 沈中华, 等. 激光等离子体的声学诊断研究[J]. 光学学报, 1998, 18(2): 212-216.
- 7 Ni X W, Chen J P, Shen Z H, *et al.* Study of the attenuation of laser-induced plasma shock wave [J]. International Journal Optoelectronics, 1998, 12(2): 37-39.