

熔石英激光诱导损伤的太赫兹检测

施卫^{1*}, 尚小燕^{1,2}, 苏俊宏², 董陈岗¹

¹西安理工大学理学院, 陕西 西安 710054;

²西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 基于透射式太赫兹时域光谱系统,对熔石英在不同能量激光诱导损伤与未损伤区域进行检测,获得其时域光谱及 0.8~1.25 THz 频谱图,分析了峰峰值、振幅、透射谱、折射率及吸收系数,结果表明,损伤区域与未损伤区域相比,其峰峰值、振幅、透射谱、折射率明显减小,且随着激光诱导能量的增加,损伤面积增大,这些参数也逐渐减小;吸收系数呈相反的变化趋势。因此,可利用熔石英太赫兹波段光学特性的变化,对其激光诱导损伤和损伤程度进行识别,为太赫兹时域光谱技术在激光诱导损伤识别分析中的应用做良好的铺垫。

关键词 太赫兹时域光谱; 熔石英; 激光诱导损伤; 识别检测

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614018

Terahertz Inspection of Laser-Induced Damage of Fused Silica

Shi Wei^{1*}, Shang Xiaoyan^{1,2}, Su Junhong², Dong Chengang¹

¹Faculty of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

²School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract In this study, the undamaged and damaged areas in fused silica induced by laser with different energies were tested with the transmission terahertz time-domain spectral system. The time domain signal and frequency spectra of 0.8-1.25 THz are obtained. The peak-to-peak value, amplitude, transmission spectrum, refractive index, and absorbance are analyzed. The results show that the peak-to-peak value, amplitude, transmission spectrum, and refractive index of the damaged area are obviously reduced compared with those of the undamaged area, and with the increase of laser energy and the enlargement of damaged area, these parameters gradually decrease. In contrast, the absorbance exhibits an opposite change. Therefore, the variation in the optical properties of fused silica in the terahertz wave band could be applied to distinguish the damages and analyze the degree of damage, which provides a good basis for applying the terahertz time domain spectral technique to the identification and analysis of laser-induced damage.

Key words terahertz time-domain spectroscopy; fused silica; laser induced damage; identification and inspection

OCIS codes 300.6365; 160.2750; 140.3440

1 引 言

光学元件是高能激光系统的核心元件,它在高能激光诱导下会发生损伤,形成缺陷。如何判断光学元件是否损伤是测定其激光损伤阈值、提高其抗激光损伤能力的前提^[1-3]。目前的判别方法有相衬显微镜法、散射光检测法、图像法、声学判别法等^[4],每种方法都有其合理性,但都不能完全解决损伤判别问题。太赫兹波通常是指频率位于 0.1~10 THz

的电磁波,介于微波与红外波段之间,被称为亚毫米波或远红外波,由于其特殊的波谱位置,引起国际上的广泛关注^[5]。近年来,太赫兹时域光谱技术是发展较快的太赫兹技术之一,是一种新型的光谱测量技术,该技术通过太赫兹波透过样品或从样品表面反射,携带了样品丰富的物理和化学信息,获得的太赫兹时域信号经处理后,可将样品在太赫兹频段的振幅及相位信息同时提取出,用于分析样品的结构及成分等相关信息。它能够对半导体、电介质材料、

收稿日期: 2019-01-28; 修回日期: 2019-02-26; 录用日期: 2019-03-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0701005)、国家自然科学基金重大仪器研制项目(61427814)、陕西省教育厅重点科学研究计划(18JS046)

* E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

非极性材料、复合材料等物理信息进行准确测量^[6-9]。Stoik 等^[10]应用时域峰值和峰值时间对航空复合材料不同时间和温度热损伤缺陷进行检测; Angrisani 等^[11]针对航空复合材料出现的早期亚毫米裂纹进行了无损检测; Jansen 等^[12]应用太赫兹成像技术检测出聚乙烯等材料样品的分层、夹杂等缺陷; Ospald 等^[13]利用太赫兹时域光谱技术,检测出了航空复合材料表面缺陷、内嵌缺陷和蜂窝结构; 廖晓玲等^[14]利用反射式时域光谱 (THz-Time-Domain Spectroscopy) 系统对碳纤维复合材料表面缺陷进行了无损检测,验证了该方法的可行性; 郭小弟等^[15]采用太赫兹波技术对玻璃纤维复合材料表面缺陷进行无损检测; Naftaly 等^[9]利用太赫兹时域光谱分析了石英玻璃、BK7 玻璃等的材料特性。以上研究结果表明,太赫兹时域光谱技术是分析光学元件很好的工具,利用其检测样品缺陷的能力,对光学元件的激光诱导损伤进行检测,以寻求一种新的损伤判别研究思路。

本文利用透射式太赫兹时域光谱系统,以高功率激光装置中重要的光学元件熔石英为研究对象,通过获取其在不同能量激光诱导下损伤区域与未损伤区域的太赫兹透射时域及频域光谱,提取其对应的振幅信息,计算其透射谱、吸收系数及折射率,并比较他们在损伤与未损伤区域的差异,为判别光学元件的激光诱导损伤提供新的研究途径,为利用太赫兹时域光谱技术检测光学元件的激光诱导损伤程

度提供一定的实验依据。

2 实验系统及样品

2.1 透射式太赫兹时域光谱系统

实验样品通过透射式太赫兹时域光谱系统进行检测,如图 1 所示。系统采用 MaiTai 激光器,其中心波长为 800 nm,脉宽为 60 fs,重复频率为 80 MHz,输出功率为 950 mW^[16]。激光器发出飞秒激光脉冲,经反射镜 M1, M2 及分束镜 CBS 后,分为两路,一路为抽运光路,一路为探测光路。抽运光经时间延迟系统后,由反射镜 M5 反射及透镜 L1 聚焦于光电导天线 PCA 上,产生太赫兹脉冲,该脉冲经离轴抛物面镜 PM1 准直,由 PM2 会聚于被测样品上,透过样品的太赫兹脉冲,由 PM3 准直,经 PM4 聚焦,透过硅片,由 ZnTe 电光晶体接收;探测光由反射镜 M6, M7, M8 及硅片反射后,到达 ZnTe 晶体。当没有太赫兹脉冲产生时,通过调节四分之一波片,使平衡探测器输出的电压为零,锁相放大器的输出为零;当产生太赫兹脉冲时,通过时间延迟系统,使得太赫兹脉冲与探测光脉冲同时通过 ZnTe 晶体,由于太赫兹电场改变了 ZnTe 晶体的折射系数,出射的探测光脉冲变为椭圆偏振光,经 Wallaston 棱镜后,两束偏振光强度不同,平衡探测器输出电压不为零,其大小反映了太赫兹电场的电场强度。通过逐点延迟时间,由探测光的椭圆偏振变化获得整个太赫兹脉冲的时域光谱。当样品被测

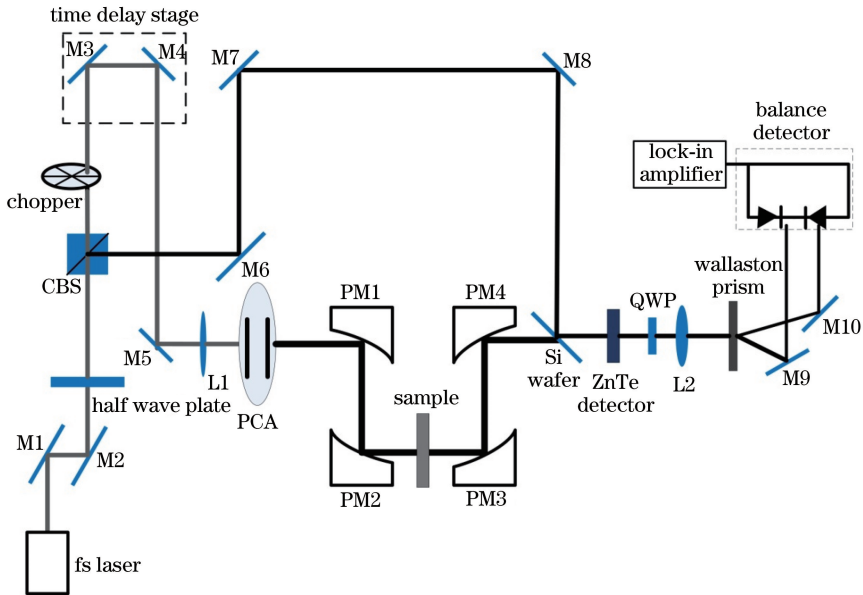


图 1 透射式太赫兹时域光谱系统测试系统图

Fig. 1 Test principle of transmission terahertz time-domain spectral system

时,将其置于离轴抛物面镜 PM2 的焦点处,使太赫兹脉冲接近垂直入射,经系统接收后,可获得携带有样品信息的太赫兹时域光谱。经傅里叶变换后,得到相应的太赫兹频谱,提取出一定频谱范围的振幅和相位信息。实验时,整个系统在空气环境下进行,温度为 22.5 °C,相对湿度为 14%,实验系统的信噪比为 1005 dB。

2.2 实验样品

图 2 为激光诱导损伤测试装置示意图,用于对

样品进行损伤诱导。激光器为 Nd:YAG 固体激光器,其输出波长为 1064 nm,脉宽为 10 ns,最大输出能量为 400 mJ,输出的激光束经衰减器衰减后,经透镜聚焦系统会聚于被测光学元件的表面,同时由能量计实测被测光学元件的辐照激光能量。实验样品选用熔石英,在相同的激光辐照时间下,以 50,60,70,80 mJ 激光能量辐照,致其损伤;样品的损伤与未损伤区域用显微镜观察,结果如图 3 所示。

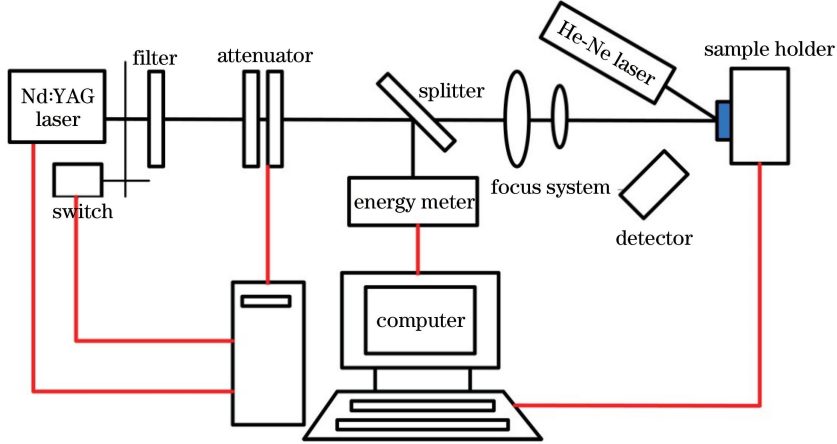


图 2 激光诱导损伤测试装置示意图

Fig. 2 Schematics of instrument for laser induced damage test

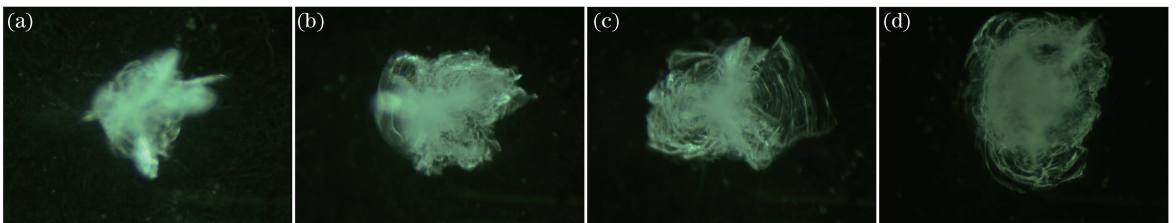


图 3 熔石英在不同激光能量诱导下损伤图。(a) 50 mJ;(b) 60 mJ;(c) 70 mJ;(d) 80 mJ

Fig. 3 Damage images of fused silica induced under different laser energies. (a) 50 mJ; (b) 60 mJ; (c) 70 mJ; (d) 80 mJ

3 实验原理模型

太赫兹波透过样品的测量模型如图 4 所示。虚线框表示没有样品,太赫兹波在空气中传播,其厚度

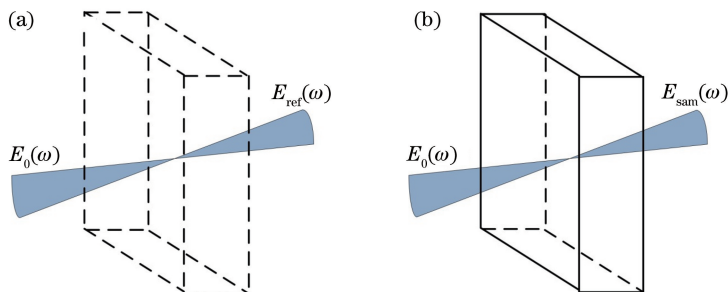


图 4 样品的测量模型示意图。(a)太赫兹波在空气中传播;(b)太赫兹波透过被测样品

Fig. 4 Schematics of sample test models. (a) Terahertz wave propagates in air; (b) terahertz wave penetrates into the sample

对应被测样品的厚度。设样品架到探测器距离为 L ,通过空气的太赫兹信号为参考信号 $E_{ref}(\omega)$,通过厚度为 d 的被测样品太赫兹信号为样品信号 $E_{sam}(\omega)$,空气和被测样品折射率分别表示为 n_0 和

\tilde{n}_s, ω 为角频率,若入射的太赫兹信号为 $E_0(\omega)$,则

$$E_{\text{ref}}(\omega) = E_0(\omega) \exp\left(-j \frac{n_0 \omega L}{c}\right), \quad (1)$$

式中 c 为太赫兹波在真空中的传播速度。由于样品比较厚,根据 Fresnel 方程得

$$E_{\text{sam}}(\omega) = E_0(\omega) \exp\left(-j \frac{n_0 \omega L}{c}\right) \frac{4n_0 \tilde{n}_s(\omega)}{[\tilde{n}_s(\omega) + n_0]^2} \exp\left\{-j \frac{\omega[\tilde{n}_s(\omega) - n_0]d}{c}\right\}. \quad (2)$$

将空气折射率 $n_0 = 1$ 、样品的复折射率 $\tilde{n}_s(\omega) = n_s(\omega) - ik_s(\omega)$ 代入(2)式,得

$$E_{\text{sam}}(\omega) = E_0(\omega) \exp\left(-j \frac{\omega L}{c}\right) \frac{4n_s(\omega)}{[n_s(\omega) + 1]^2} \cdot \exp\left[-\frac{\omega k_s(\omega)d}{c}\right] \exp\left\{-j \frac{\omega[n_s(\omega) - 1]d}{c}\right\}, \quad (3)$$

式中: $n_s(\omega)$ 为实折射率,反映样品的色散特性; $k_s(\omega)$ 为消光系数,描述样品的吸收特性。太赫兹透过样品的传递函数 $H(\omega)$ 为^[17-18]

$$H(\omega) = \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} = \frac{4n_s(\omega)}{[n_s(\omega) + 1]^2} \exp\left[-\frac{\omega k_s(\omega)d}{c}\right] \exp\left\{-j \frac{\omega[n_s(\omega) - 1]d}{c}\right\} = \rho(\omega) \exp[-j\phi(\omega)], \quad (4)$$

式中 $\rho(\omega)$ 、 $\phi(\omega)$ 为样品信号和参考信号的幅值比和相位差。由于吸收系数 $\alpha(\omega) = \frac{2\omega k_s(\omega)}{c}$, 则得

$$\rho(\omega) = \left| \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} \right| = \frac{4n_s(\omega)}{[n_s(\omega) + 1]^2} \exp\left[-\frac{\omega k_s(\omega)d}{c}\right] = \frac{4n_s(\omega)}{[n_s(\omega) + 1]^2} \exp\left[-\frac{\alpha(\omega)d}{2}\right], \quad (5)$$

$$\phi(\omega) = \frac{\omega[n_s(\omega) - 1]d}{c}. \quad (6)$$

由(5)式及(6)式得样品的折射率和吸收系数为

$$n_s(\omega) = \frac{c\phi(\omega)}{\omega d} + 1, \quad (7)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln \frac{[n_s(\omega) + 1]^2}{4n_s(\omega)} \left| \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} \right|. \quad (8)$$

4 实验结果分析与讨论

基于透射式 THz-TDS 系统检测熔石英激光诱导损伤的实验结果如图 5 所示。图 5(a) 为无样品时的参考时域波形,图 5(b) 为太赫兹波透过未损伤及在激光能量为 50, 60, 70, 80 mJ 诱导下损伤的熔石英太赫兹时域波形。信号的峰峰值如表 1 所示。

太赫兹波透过未损伤熔石英后的信号峰峰值为参考信号的 51%, 时间延迟 6.5 ps, 时间延迟由熔石英的折射率大于空气的折射率所引起; 幅值衰减是由材料对太赫兹波的吸收大于空气的吸收, 以及样品对太赫兹波的反射和散射所造成的。对于熔石英在激光能量 50, 60, 70, 80 mJ 诱导下损伤的区域, 太赫兹透射信号峰峰值分别为未损伤区域的 76%, 71%, 64%, 35%, 都低于未损伤值, 且随着激光诱导能量的增加, 信号的峰峰值逐渐减小, 原因是熔石英受激光辐照损伤后, 表面形貌发生了变化, 如图 3 所示, 损伤处出现熔融、烧蚀、裂纹等现象, 增强了对太

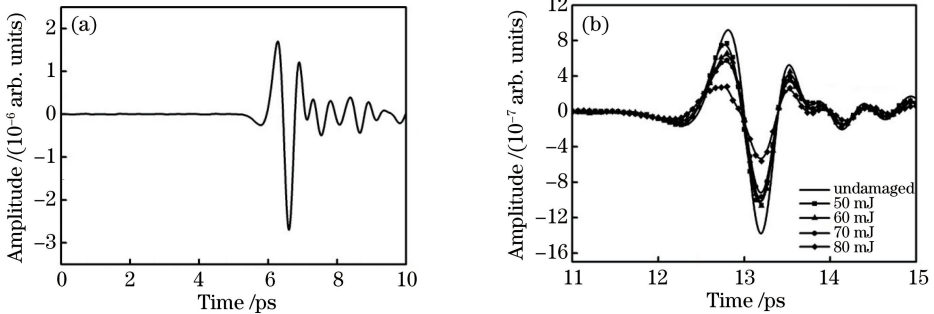


图 5 测试时域波形。(a) 无样品的参考信号; (b) 熔石英在不同能量激光诱导下损伤与未损伤区域信号

Fig. 5 Time-domain waveforms when tested. (a) Reference signal without the sample; (b) waveforms of undamaged and damaged areas in fused silica under different laser energies

赫兹波的吸收和散射^[19],使透过的太赫兹波信号强度减弱;同时,损伤区域面积随能量的增加而变大,损伤面积越大,对太赫兹波产生越强的吸收和散射。

表 1 参考信号及熔石英损伤与未损伤区域时域信号峰峰值
Table 1 Peak-to-peak values of reference signal as well as time-domain waveforms of damaged and undamaged areas in fused silica 10^{-6} arb.units

Signal type	Maximum	Minimum	Peak-to-peak
Reference	1.77	-2.89	4.66
Undamaged	0.95	-1.45	2.4
50 mJ	0.77	-1.06	1.83
60 mJ	0.66	-1.06	1.72
70 mJ	0.58	-0.96	1.54
80 mJ	0.28	-0.56	0.84

对获得的所有时域信号进行傅里叶变换,得到 0.8~1.25 THz 太赫兹频谱图,如图 6 所示,由于测量在空气环境中进行,图中出现了明显的水蒸气吸收峰^[20-21]。从图 6 可知,熔石英在 0.8~1.25 THz 范围内,损伤区域的振幅均低于未损伤区域,且随着激光诱导能量的增加,损伤区域在各个频率处振幅值逐渐减小,将能量为 50 mJ 的激光诱导损伤区域与未损伤区域相比,振幅值下降明显,在 50, 60, 70 mJ 的激光诱导能量作用下损伤区域振幅下降较慢,而在 80 mJ 能量作用下损伤区域振幅下降加快,分析主要原因是熔石英从未损伤到损伤,表面由平整变为微坑分布状态,对各个频率的太赫兹波形成强烈的吸收和散射,而随着激光诱导能量的增加,熔石英的损伤面积和损伤深度都会增加^[22],在 50, 60, 70 mJ 的激光诱导能量作用下,损伤面积逐渐增大,但损伤深度增长较缓,表面对不同频率太赫兹波的吸收和散射起主要作用,所以幅值下降较慢,当激光诱导能量为 80 mJ 时,损伤面积及损伤深度继续增加,表面和体内都对太赫兹波产生了吸收和散射作用,所以幅值下降明显。

激光诱导损伤会改变光学元件的光学性能,因此根据透射谱的计算公式^[23]

$$T(\omega) = \left[\frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} \right]^2, \quad (9)$$

求得熔石英未损伤区域与在不同激光能量诱导下损伤区域的透射谱曲线,如图 7 所示。

由图 7 可知,在 0.8~1.25 THz 范围内,随着频率的增加,熔石英的透射率呈下降趋势,说明熔石英对不同频率的太赫兹波的吸收不同。同时,随着激光诱导能量的增加,在同一频率处透射率下降,这是由振幅随激光诱导能量增加而减少的原因所致。

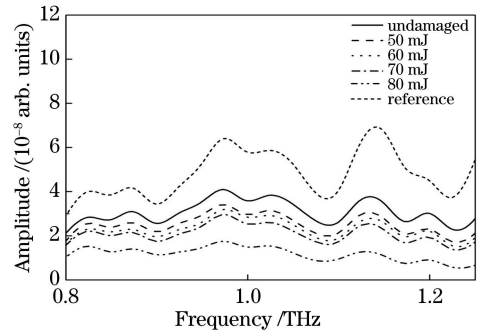


图 6 参考信号及熔石英未损伤与不同激光能量诱导损伤区域的频谱振幅图

Fig. 6 Amplitude spectra of reference signal, undamaged area and damaged areas in fused silica under different laser energies

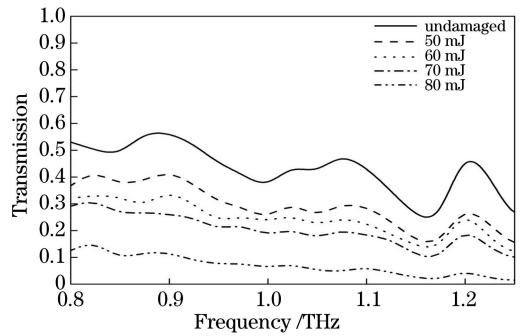


图 7 熔石英未损伤与不同激光能量诱导下损伤区域的透射谱曲线

Fig. 7 Transmission spectra of undamaged and damaged areas in fused silica under different laser energies

按照(7)式和(8)式计算熔石英未损伤区域及在不同激光能量作用下损伤区域的折射率和吸收系数,结果如图 8、图 9 所示。由图 8 知,在 0.8~1.25 THz 频段范围内,未损伤熔石英的折射率在 1.95~1.97 范围内,略高于文献^[24]所述的值,在此波段色散很小。受激光能量诱导损伤后的折射率值都低于未损伤区域的,其中在 50, 60, 70 mJ 激光能量诱导下损伤区域的值略低于未损伤区域的,且值很相近;在 80 mJ 能量作用下,值明显低于未损伤区域。当熔石英在不同能量诱导时,由于高温熔融、等离子体及冲击波的作用,损伤后,出现微损伤坑,且结构复杂,坑壁和内部材料的性质发生变化^[25],而折射率是材料光学性质的一个表征,材料性质发生变化,折射率也发生变化,损伤后,折射率的降低,对应材料光学密度值的降低^[24]。图 9 为吸收系数曲线,在 0.8~1.25 THz 范围内,变化趋势与图 7 的透射谱曲线恰好相反,也进一步说明熔石英在不同能量诱导下损伤的幅值、透射谱的下降,是由损伤处对太赫兹波产生了更强烈的吸收所致。由于实验条件

的限制,太赫兹光斑直径约为 1.5 mm,能量为微瓦级别,因此测量中只能对大于 0.6 mm 的损伤点进行测试,对于更小的损伤点,需要更小的测试光束,以及更高的功率。

伤机理提供技术依据。

参 考 文 献

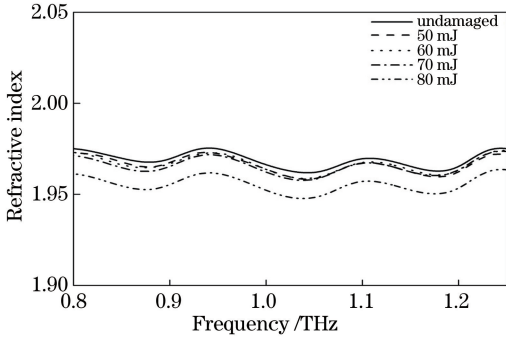


图 8 熔石英未损伤与不同激光能量诱导下损伤区域的折射率曲线

Fig. 8 Refractive index curves of undamaged and damaged areas in fused silica under different laser energies

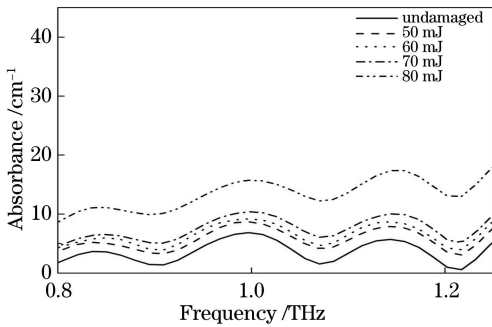


图 9 熔石英未损伤与不同激光能量诱导下损伤区域的吸收系数曲线

Fig. 9 Absorbance curves of undamaged and damaged areas in fused silica under different laser energies

5 结 论

利用透射式 THz-TDS 系统,对熔石英在不同激光能量诱导下的损伤与未损伤区域进行检测,得到其时域波形及频谱振幅图,并计算其在 0.8~1.25 THz 的透射谱、折射率及吸收系数。经分析发现,对于时域峰峰值、频谱振幅值、透射谱及折射率,损伤区域相对于未损伤区域显著减小,且随着激光诱导能量的增加,损伤面积增大,这些参数也逐渐减小;而吸收系数的变化恰好相反。这表明利用太赫兹时域光谱技术可对熔石英的激光诱导损伤进行有效的检测,同时提取出熔石英激光诱导损伤与未损伤区域的光学特性参数并进行比较,对损伤进行判别,并分析损伤程度,结果为研究光学元件激光诱导损伤识别提供新的研究思路,为分析光学元件的损

[1] Ge J M, Su J H, Chen L, *et al.* A new method for measurement of laser-induced damage threshold[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1296-1299.
葛锦蔓, 苏俊宏, 陈磊, 等. 一种激光损伤阈值测试新方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1296-1299.

[2] Zhou Q, Wang J B, Qiu R, *et al.* Ultra-fast diagnosis of nanosecond laser induced fused silica damage[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0303003.
周强, 王俊波, 邱荣, 等. 纳秒激光诱导熔石英玻璃损伤的超快诊断[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0303003.

[3] Shan C, Zhao Y A, Zhang X H, *et al.* Study on laser damage threshold of optical element surface based on Gaussian pulsed laser spatial resolution[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0104002.
单翀, 赵元安, 张喜和, 等. 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[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0104002.

[4] Su J H, Wang K K, Liang H F. Acoustic detection method of optical thin film damage based on frequency characteristics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(7): 22-26.
苏俊宏, 王坤坤, 梁海锋. 基于频率特征的薄膜损伤声学判别方法[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 22-26.

[5] Zhao K, Zhan H L. Terahertz spectrum analysis technology[M]. Beijing: Science Press, 2017: 4-6.
赵昆, 詹洪磊. 太赫兹光谱分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 4-6.

[6] Yan Z J, Shi W, Hou L, *et al.* Investigation of aging effects in cross-linked polyethylene insulated cable using terahertz waves [J]. Materials Research Express, 2017, 4(1): 015304.

[7] Ma F Y, Chi Q, Su J P, *et al.* Study on the optical properties of ultra-thin metal films in the THz band [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(3): 610-613.
马凤英, 池泉, 苏建坡, 等. 超薄金属膜在太赫兹波段的光学特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(3): 610-613.

[8] Grischkowsky D, Keiding S, van Exter M, *et al.* Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(10): 2006-2015.

- [9] Naftaly M, Miles R E. Terahertz time-domain spectroscopy of silicate glasses and the relationship to material properties[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(4): 043517.
- [10] Stoik C D, Bohn M J, Blackshire J L. Nondestructive evaluation of aircraft composites using transmissive terahertz time domain spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 17039-17051.
- [11] Angrisani L, Bonavolonta F, Schiano Lo Moriello R, *et al.* First steps towards innovative compressive sampling based-THz imaging system for early crack aerospace plates [C] // 2014 IEEE Metrology for Aerospace, May 29-30, 2014, Benevento, Italy. New York: IEEE, 2014: 488-493.
- [12] Jansen C, Wietzke S, Wang H Y, *et al.* Terahertz spectroscopy on adhesive bonds [J]. *Polymer Testing*, 2011, 30(1): 150-154.
- [13] Ospald F, Zouaghi W, Beigang R, *et al.* Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(3): 031208.
- [14] Liao X L, Wang Q, Gu X H, *et al.* Nondestructive inspection of carbon fiber composite materials based on THz-TDS[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(10): 1255-1260.
廖晓玲, 王强, 谷小红, 等. 基于 THz-TDS 的碳纤维复合材料无损检测[J]. *激光与红外*, 2015, 45(10): 1255-1260.
- [15] Guo X D, Wang Q, Gu X H, *et al.* Analysis of terahertz spectroscopic inspection experiment for glass fiber composite material defects [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 764-768.
郭小弟, 王强, 谷小红, 等. 玻璃纤维复合材料缺陷的太赫兹光谱检测实验分析[J]. *红外技术*, 2015, 37(9): 764-768.
- [16] Chen S G, Hou L, Lou X, *et al.* Investigation of terahertz continuous wave imaging and pulse wave imaging [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2013, 29(2): 127-132.
陈素果, 侯磊, 楼晓, 等. 太赫兹波脉冲成像和连续波成像技术研究[J]. *西安理工大学学报*, 2013, 29(2): 127-132.
- [17] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(7): 1562-1571.
- [18] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 739-746.
- [19] Wang H X, Shen L, Li C F, *et al.* Analysis and experimental investigation of laser induced damage of optics[J]. *Chinese Journal of 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
- [20] Zhou X, Deng H, Luo Z F, *et al.* Study of transmission characteristics of water vapor based on terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Infrared*, 2013, 34(6): 20-24.
周逊, 邓琥, 罗振飞, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的水蒸气传输特性研究[J]. *红外*, 2013, 34(6): 20-24.
- [21] Li J, Deng Q C, Xiong L. Transmission characteristics of terahertz wave in water vapor transmitted 0.6 m[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 090101
李进, 刘泉澄, 熊亮. 水蒸气中太赫兹波 0.6 m 行程下的传输特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 090101.
- [22] Liu H J, Wang F R, Luo Q, *et al.* Experimental comparison of damage performance induced by nanosecond 1ω laser between K9 and fused silica optics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(7): 076103.
刘红婕, 王凤蕊, 罗青, 等. K9 和熔石英玻璃纳秒基频激光损伤特性的实验对比研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(7): 076103.
- [23] Li J. Studies on the terahertz time-domain spectroscopy signal analysis and substance identification methods based on the geometric algebra [D]. Xi'an: Xidian University, 2012: 40-42.
李静. 基于几何代数的太赫兹时域光谱信号分析及物质识别方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 40-42.
- [24] Wang L. Terahertz radiation generation, detection, and terahertz time domain spectroscopy of molecules and solids [D]. Changchun: Jilin University, 2008: 49-51.
王琳. 太赫兹辐射的产生、探测及一些分子和固体的太赫兹时域光谱[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 49-51.
- [25] Qiu R. Research of high-power laser-induced damage of optical elements [D]. Sichuan: China Academy of Engineering Physics, 2013: 30-32.
邱荣. 强激光诱导光学元件损伤的研究[D]. 四川: 中国工程物理研究院, 2013: 30-32.