

遮挡物的 2.52 THz 透射成像实验研究

李 琦 姚 睿 丁胜晖 王 琪

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要 太赫兹成像的优势在于能够穿透大多数非金属、非极性物质进行隐藏物的探测,而且不会对生物体造成伤害,因此,对常见包装品和衣物的穿透能力对于太赫兹成像系统的评估显得十分重要。利用 CO₂ 激光抽运太赫兹激光器所搭建的 2.52 THz 透射扫描成像系统对剃须刀、铅笔字、纸币和塑料瓶盖等多种物体进行了穿透力实验;以纸、纸质快递信封和实验服为遮挡物,进行了成像对比分析。实验结果表明,成像装置可以穿透 13 层 A4 纸、双层实验服或双层特快专递信封成像,最大插入损耗近 50 dB。

关键词 成像系统;太赫兹成像;遮挡物;穿透能力;扫描

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0711001

Experiment on 2.52 THz Transmission-Mode Imaging for Concealed Objects

Li Qi Yao Rui Ding Shenghui Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract Terahertz (THz) imaging has the advantage that the THz radiation can penetrate most nonmetal and nonpolar materials for concealed objects detection, while it is harmless to organism. The penetration ability for common packaging materials and clothes thus become very important to evaluate a THz imaging system. In the paper, penetration experiments are carried out by use of a 2.52-THz transmission-mode scanning system. The system is constructed based on a CO₂ laser pumped THz laser. The imaging targets are razor blade, penciled character, banknote, and plastic bottle cap. Paper, paper envelope, and lab gown are used as shelters, and the imaging results are compared and analyzed. The experimental results demonstrate that the system can image through 13 pieces of A4 paper, 2 layers of lab-gown, or 2 layers of paper envelope. The maximum attenuation approaches 50 dB.

Key words imaging systems; terahertz imaging; shelter; penetration ability; scanning

OCIS codes 110.0110; 110.6795; 110.3000

1 引 言

太赫兹 (THz) 成像是当今成像研究中的热点^[1~3]。在 THz 二维逐点扫描成像中,光抽运的连续 THz 激光源是最早辐射源。随着光抽运的连续 THz 激光源不断发展,其功率、稳定性、可靠性都有很大提高,体积也有所减小。美国相干公司的 CO₂ 激光抽运 THz 激光器已用于航天领域。相对飞秒激光器激发光导天线产生的 THz 辐射,CO₂ 激光抽运 THz 激光器有较高的功率和较小的体积;相对量子级联激光器,CO₂ 激光抽运 THz 激光器可常温工作。相对耿氏 THz 辐射源,CO₂ 激光抽运

THz 激光器可以提供更高频率的输出,从而具有更高的分辨率。因此,它不仅是较理想的连续成像原理性研究的 THz 辐射源,而且也具有实际应用价值^[4~6]。Mohammed 等^[7]利用自制输出 10 mW 的 CO₂ 激光抽运 THz 激光器(波长 118.83 μm)进行了半共焦透射成像,提出了利用参考光探测消除激光器输出不稳定引起的噪声。Siegel 等^[8]利用 CO₂ 激光抽运 THz 激光器将 2.5 THz 外差成像用于生物医学领域。Dickinson 等^[9]用两台 CO₂ 激光抽运 THz 激光器完成了点扫描外差成像实验。

太赫兹成像的优势在于能够穿透大多数非金

收稿日期: 2011-01-10; 收到修改稿日期: 2011-02-21

作者简介: 李 琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像方面的研究。

E-mail: hit_liqi@yahoo.com.cn

属、非极性物质进行隐藏物的探测,而且不会对生物体造成伤害,因此,太赫兹成像系统对于常见包装品和衣物的穿透能力显得十分重要。成像系统的穿透能力取决于太赫兹源的功率、探测器的灵敏度以及光学系统的能量损耗。在 THz 成像系统中,穿透能力是一个重要性能参数以及研究热点^[10,11]。虽然共焦显微成像通过在焦平面处加小孔限制成像光斑尺寸,从而提高成像分辨率,但是多个小孔的加入会大幅降低成像光束的能量,降低能量利用率,使得成像系统对隐藏物的探测能力大幅降低。外差成像虽然可以提高穿透力,但需要双辐射源和精密的成像系统,体积较大、结构复杂。国内尚未进行较多的 CO₂ 激光抽运 THz 激光器 2.52 THz 透射扫描成像穿透能力实验研究,且穿透衣物的实验尚未见报道。

本文利用一台 CO₂ 激光抽运 THz 激光器所搭建的 2.52 THz 透射扫描成像系统对剃须刀、铅笔字和塑料瓶盖等物体进行了穿透力实验,获得衣物等不同遮挡物的不同目标图像,并进行了比较分析。

2 二维透射扫描成像原理

采用相干公司 CO₂ 激光抽运连续太赫兹激光器 SIFIR-50 作为成像光源,激光工作频率为 2.52 THz,输出功率约 50 mW。图 1 给出 THz 透射成像系统原理图。He-Ne 激光作为指示光源,THz 激光输出后首先经过单晶 Si 分光片后与氦氖光源合束,M1 至 M5 均为离轴抛物面反射镜,光束经过焦距 15 cm 的 M1 聚焦后由斩波器进行调制,斩波频率为 10 Hz。聚焦后的光束经过焦距 10 cm 的 M2 和焦距 5 cm 的 M3 后重新聚焦,将 M3 的焦平面作为成像物面,在此处放置二维平移台,经过物面的透射光由焦距 10 cm 的 M4 和焦距 5 cm 的 M5 聚焦到单元探测

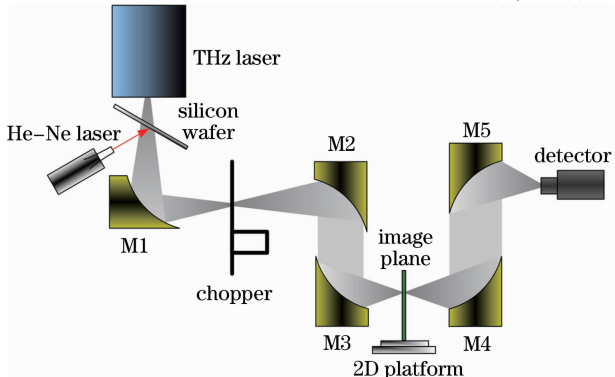


图 1 THz 成像系统装置图

Fig. 1 Schematic diagram of THz imaging setup

器——室温型 LiTaO₃ 热释电探测器 (Molelectron Int., P4-42) 上。

使用自行设计的扫描成像系统的控制软件,实现以下功能:

- 1) 配置步进电机控制器,控制二维平移台移动实现对目标的二维扫描;
- 2) 配置数据采集卡,对探测器获得的图像数据进行采集。可以通过软件选择量程,以期精度最高,共有 $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 2.5\text{ V}$, $\pm 1.25\text{ V}$, $\pm 0.625\text{ V}$, $0\sim 10\text{ V}$, $0\sim 5\text{ V}$, $0\sim 2.5\text{ V}$, $0\sim 1.25\text{ V}$ 9 个量程;
- 3) 将采集到的数据处理后实时显示到计算机上,得到实时更新的动态图像,以监控成像进程;
- 4) 数据存储。

控制软件中主要设置参数为采集时间间隔、扫描步长、图像大小、采集卡量程和显示阈值。通过控制平移台的移动实现对目标的逐点扫描,透过目标后的 THz 能量被 M4, M5 搜集并聚焦至探测器表面。探测器的电压响应与入射的 THz 强度成正比,通过采集探测器的输出电压信号获得 THz 图像。

3 遮挡物成像实验

实验中,采用 A4 纸、纸质快递信封和实验服作为遮挡物,在 2.52 THz 波段,单层 A4 纸、双层特快专递信封和双层实验服的插入损耗分别约为 3.7、25 和 20 dB。图 2 给出了实验中遮挡物的照片。实验中原始图像均采用线性对比度拉伸,使图像灰度值在 $0\sim 255\text{ pixel}$ 范围内。



图 2 遮挡物实物图。(a) 双层纸质快递信封;(b) 双层实验服

Fig. 2 Photo of shelter. (a) 2 layers of envelope;

(b) 2 layers of lab-gown

透过 6 张纸,对 10 元和 5 元人民币的水印进行成像,如图 3 所示,采集时间间隔 500 ms,步长 0.5 mm,10 元的图像大小为 $52\text{ pixel}\times 58\text{ pixel}$,5 元的图像大小为 $50\text{ pixel}\times 52\text{ pixel}$ 。由于水印的明暗是由纸钞内的纤维含量所决定的,所以图像的对比度不太高。

图 4 给出对塑料瓶盖的成像结果,扫描步长 1 mm,扫描时间间隔 500 ms,图像大小 $36\text{ pixel}\times$

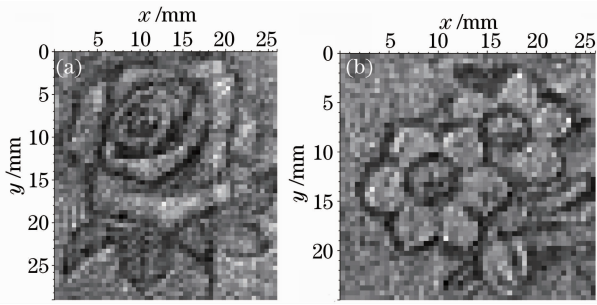


图 3 纸币水印透过 6 张纸成像。(a) 10 元;(b) 5 元

Fig. 3 THz images of watermark banknote through 6 pieces of paper and image enhancement. (a) ¥10; (b) ¥5

40 pixel。在 2.52 THz 波段 12 张 A4 纸的插入损耗约为 44.4 dB。由于瓶盖侧壁较高,THz 透射率较低,因此,THz 图像中出现背景最亮,中间圆盘(即瓶盖顶部非侧壁部分)较暗,外圈圆环(即瓶盖侧壁)最暗。隔 12 张 A4 纸比隔双层实验服的成像结果噪声更高,但图像还较清晰。

对相间 0.4 mm 的条状金属和聚四氟乙烯板成像,隔 5 张和 11 张纸进行成像的实验结果如图 5(a),

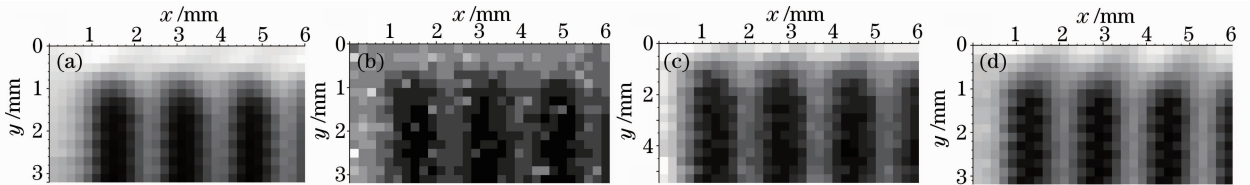


图 5 透过不同遮挡物的成像结果。(a) 5 张纸;(b) 11 张纸;(c) 双层快递信封;(d) 双层实验服

Fig. 5 Imaging results through different shelters. (a) 5 pieces of paper; (b) 11 pieces of paper; (c) 2 layers of envelope; (d) 2 layers of lab-gown

图 6 分别给出透过 12 张 A4 纸、13 张 A4 纸、双层纸质快递信封和双层实验服对剃须刀片的成像结果。扫描步长 0.5 mm,扫描时间间隔 400 ms,图像大小 48 pixel×54 pixel。由于刀片分辨率不太高,最细部分约 1 mm,因此,图像对比度较高,穿透

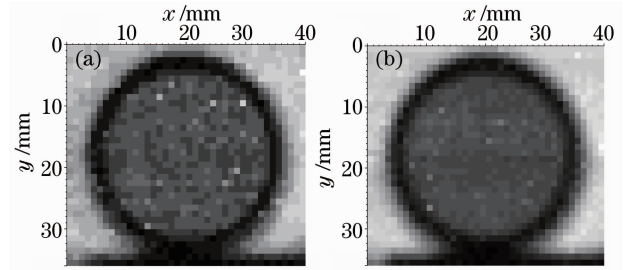


图 4 瓶盖透过不同遮挡物的成像结果。(a) 12 张纸;(b) 双层实验服

Fig. 4 Imaging results of bottle cap through different shelters. (a) 12 pieces of paper; (b) 2 layers of lab-gown

(b) 所示,图像大小为 16 pixel×30 pixel,步长 0.2 mm,5 张纸和 11 张纸在 2.52 THz 波段的插入损耗分别约为 18.5 dB 和 40.7 dB;隔双层快递信封和双层实验服的成像结果如图 5(c),(d) 所示。可见,由于目标分辨率很高,透射率最低的隔 11 张纸的图像就有很多噪声,但依然可以区分条纹,只是对比度较隔 5 张纸图像明显降低。

较多纸张后仍然可以清晰成像。但当纸张较多时,成像光束质量已经开始下降,刀片内部纹理的边缘轮廓已经开始模糊,当超过 13 张纸时,插入损耗在 48.1 dB 以上,噪声水平已经严重影响了成像质量,然而目标轮廓依然可辨。

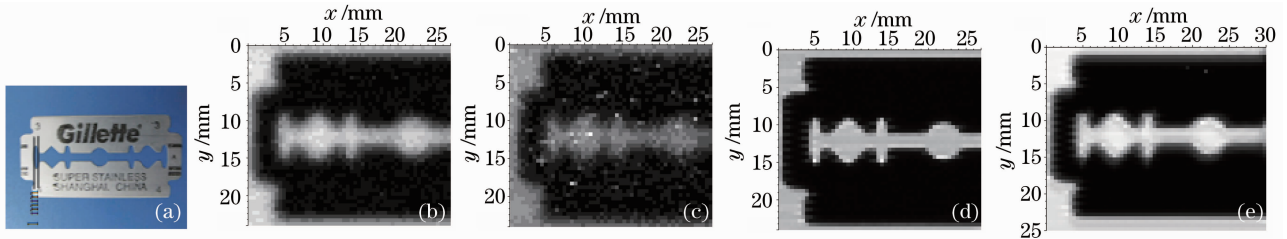


图 6 刀片透过不同遮挡物的成像结果。(a) 实物图;(b) 12 张纸;(c) 13 张纸;(d) 双层信封;(e) 双层实验服

Fig. 6 Imaging results of razor blade through different shelters. (a) White-light image; (b) 12 pieces of paper; (c) 13 pieces of paper; (d) 2 layers of envelope; (e) 2 layers of lab-gown

太赫兹成像也可以用于透过表层非金属成分的染料和涂料对一些古代绘画作品中被隐藏的含铅底稿进行成像。这里,分别透过 11 张纸、12 张纸、双层

纸质快递信封和双层实验服对在 A4 纸上用 2B 铅笔写下的中国“龙”字进行成像,进行原理性实验,如图 7 所示。扫描步长 0.2 mm,图像大小 32 pixel×

32 pixel。显然,透过双层快递信封,“龙”字依然可辨,无畸变;透过双层实验服,有些畸变,这是因为实验服质地不够均匀,且较软,造成整幅图像中实验服

的透射率不一致;由于 12 张纸的插入损耗最大,因此,透过 12 张纸的“龙”字噪声最严重,但可通过图像处理提高图像质量,这是今后的一个研究方向。

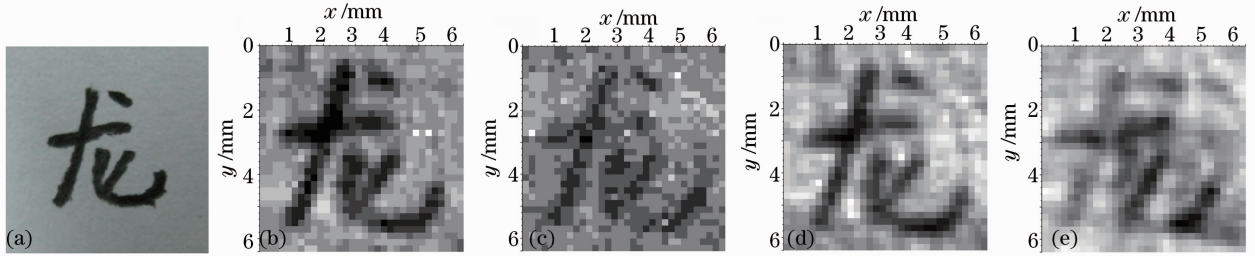


图 7 铅笔字透过不同遮挡物的成像结果。(a) 实物图; (b) 11 张纸; (c) 12 张纸; (d) 两层信封; (e) 两层实验服
Fig. 7 Imaging results of pencil character through different shelters. (a) White-light image; (b) 11 pieces of paper; (c) 12 pieces of paper; (d) 2 layers of envelope; (e) 2 layers of lab-gown

4 结 论

利用 CO₂ 激光抽运 THz 激光器所搭建的 2.52 THz 透射扫描成像系统对剃须刀、铅笔字和塑料瓶盖等多种物体进行了穿透力实验,以纸、特快专递信封和实验服为遮挡物,进行了成像对比分析。实验结果表明,本成像装置可以穿透双层实验服或双层特快专递信封成像,最大插入损耗近 50 dB。当插入损耗在 48.1 dB 以上时,噪声水平严重影响成像质量,但采用步长 0.5 mm 的目标图像轮廓还可分辨,采用步长 0.2 mm 的高分辨率目标图像轮廓不可分辨。质地均匀的遮挡物材料如纸、信封对成像结果的影响主要是由于能量衰减从而引入的噪声以及由于动态范围的下降而造成微弱细节的丢失,对于质地不均匀的遮挡物材料如实验服,除了引入噪声外,还会使得扫描结果发生一定的畸变。实验也为利用图像处理方法提高图像质量的研究提供了原始数据。

参 考 文 献

- 1 S. H. Ding, Q. Li, R. Yao *et al.*. High-resolution terahertz reflective imaging and image restoration [J]. *Appl. Opt.*, **49**(36): 6834~6839
- 2 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulse terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858

- 杨 昆, 赵国忠, 梁乘森 等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- 3 Deng Chao, Xing Chunfei, Lü Mo *et al.*. CW THz standoff imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(suppl.): 50~52
- 邓 朝, 刑春飞, 吕 默 等. 连续太赫兹波远距离成像[J]. *光学学报*, 2009, **29**(增刊): 50~52
- 4 Li Qi, Yao Rui, Yin Qiguo *et al.*. Recent advance of CO₂-pumped THz imaging [J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(2): 151~155
- 李 琦, 姚 睿, 尹奇国 等. CO₂ 激光泵浦 THz 成像研究新进展[J]. *激光技术*, 2009, **33**(2): 151~155
- 5 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. Preliminary study on 2.5 THz array real-time imaging and image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(suppl.): 84~88
- 李 琦, 姚 睿, 单纪鑫 等. 2.5 THz 面阵实时成像及图像处理初步研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(增刊): 84~88
- 6 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui *et al.*. Preliminary study on THz confocal imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): 100402
- 丁胜晖, 李 琦, 姚 睿 等. 太赫兹共焦成像的初步研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): 100402
- 7 S. Mohammed, K. Martin. Semi-confocal imaging with THz gas laser [C]. *SPIE*, 2006, **6194**: 61940A
- 8 Peter H. Siegel, Robert J. Dengler. Terahertz heterodyne imager for biomedical applications [C]. *SPIE*, 2004, **5354**: 1~9
- 9 Jason C. Dickinson, Thomas M. Goyette, Andrew J. Gatesman *et al.*. Terahertz imaging of subjects with concealed weapons [C]. *SPIE*, 2006, **6212**: 62120Q
- 10 Aurèle J. L. Adam, Paul C. M. Planken, Sabrina Meloni *et al.*. Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas [J]. *Opt. Express*, 2009, **11**(5): 3407~3416
- 11 J. F. Federici, Brian Schulkin, Feng Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications-explosive, weapons, and drugs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): S266~S280