

基于波导结构的集成式太赫兹共焦成像系统

高翔^{1,2}, 刘晓庆¹, 戴子杰¹, 李帅¹, 刘伟伟¹

(1. 南开大学现代光学研究所, 天津 300350;
2. 天津市交通运输工程质量安全监督总站, 天津 300384)

摘要: 太赫兹成像技术广泛应用于无损检测、生物医学、国防安全等领域。介绍了一种基于波导结构的太赫兹共焦成像系统。首先, 搭建了一套集成的连续太赫兹波反射式成像系统, 用金属刀片验证成像效果, 结果表明该系统能实现接近波长量级(3 mm)的空间分辨率; 其次, 对混凝土进行太赫兹成像, 能够清晰地呈现出混凝土中的钢筋结构。在此基础上, 通过在太赫兹探测器端引入金属针孔, 构建太赫兹共焦成像系统, 并将其用于泡沫中两根钢钉的空间分布检测, 实现了样品的三维信息提取, 准确测得两钢钉的空间距离(24 mm)。结果表明: 文中提出的基于波导结构的太赫兹共焦成像系统具有结构紧凑, 便携集成等优势, 特别适合于实际工程化应用。

关键词: 太赫兹; 太赫兹共焦成像; 无损检测

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S219001

Integrated terahertz confocal imaging system based on THz waveguides

Gao Xiang^{1,2}, Liu Xiaoqing¹, Dai Zijie¹, Li Shuai¹, Liu Weiwei¹

(1. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;
2. Tianjin Transportation Engineering Quality and Safety Supervision Station, Tianjin 300384, China)

Abstract: Terahertz (THz) imaging technology provides perspective applications in non-destructive inspection, medical diagnostic and national defense. An integrated terahertz confocal imaging system based on THz waveguides was reported in this paper. Firstly, a reflective THz imaging of a metal razor blade with lateral resolution close to wavelength (3 mm) was acquired. Then, a reinforcing metallic bar in concrete was detected effectively, which provided a feasible method to ensure the quality of construction. Further, by introducing a pinhole before the THz detector, a THz confocal imaging system was set up and depth information (24 mm) between two nails inserted in different depths in insulating foam could be extracted, which was three-dimensional information. The results show that the proposed terahertz confocal imaging system based on waveguides structure has the advantages of compact structure and portable integration, which is especially suitable for practical engineering applications.

Key words: Terahertz(THz); THz confocal imaging; non-destructive inspection

收稿日期: 2019-04-01; 修订日期: 2019-05-14

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504400); 国家自然科学基金(11574160); 111 计划(B16027)

作者简介: 高翔(1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事交通运输工程质量监督和科研技术方面的研究。

Email: 13672137373@163.com

通讯作者: 刘伟伟(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事超快激光脉冲在光学介质中的非线性传输方面的研究。

Email: liuweiwei@nankai.edu.cn

0 引言

太赫兹(THz)波通常定义是指频率在 0.1~10 THz (1 THz=10¹² Hz)的电磁波,相应的波长范围为0.03~3 mm^[1]。由于太赫兹波透不过金属、水等极性材料,而对于塑料、衣物等非极性材料具有很好的透过特性,同时太赫兹波具有较低的光子能量,不会对样品造成电离损伤,这些优越特性使得太赫兹成像技术在无损检测^[2-3]、安检反恐^[4]、生物医学^[5-6]、材料科学^[7-8]等领域极具应用前景,成为近年来太赫兹科学技术研究的热点。

早在 1995 年,贝尔实验室的 Nuss 和 Hu 搭建了基于太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)的脉冲太赫兹波成像系统,首次实现了对集成电路芯片和树叶的无损探测^[9]。2005 年,X.C. Zhang 等人搭建了基于连续太赫兹源的成像系统,实现对航天飞机泡沫材料的缺陷探伤^[10]。脉冲太赫兹无损检测技术,能提取样品的光谱信息,但通常是在 THz-TDS 基础上搭建,需要飞秒激光器、太赫兹天线或晶体产生、探测太赫兹脉冲,因此系统体积庞大且成本较高,限制了其实际应用。而连续太赫兹成像系统中采用的太赫兹源、探测器通常是基于电学方法制备的,具有经济便携等优势,应用潜力大。例如,2015 年,O. Gyeongsik 等人利用 210 GHz 连续太赫兹源反射成像,检测花生等食品质量^[11];2018 年,L. Corinna 设计了 0.30 THz 成像系统,用于艺术油画的品质分析^[12]。共焦成像技术作为太赫兹成像的一种,能实现对样品的层析探测或三维成像,获取样品内部更为丰富的信息^[13-14]。例如,2016 年,Q. Li 等人在设计了 2.52 THz 双轴反射式共焦成像系统,实现对样品的三维成像^[15-16]。但是目前的太赫兹共焦成像普遍采用分立光学器件,系统光路复杂,调节繁琐。太赫兹波导管实现了太赫兹波的低损耗传输,减少水汽对太赫兹的吸收,也为太赫兹共焦成像系统的集成化研究提供了可能^[17]。

文中在 0.1 THz 连续太赫兹波反射式成像系统的基础上,通过引入太赫兹波导管,搭建了一种基于波导结构的集成式太赫兹共焦成像系统。首先,用金属刀片验证太赫兹成像效果,结果表明,系统能够实现接近于波长(3 mm)的空间分辨率。接着,对混凝土进行太赫兹成像,能够清晰地呈现出混凝土中的钢

筋结构。在此基础上,通过在太赫兹探测器端引入金属针孔,构建共焦成像系统,并将其用于泡沫中两根钢钉的空间分布检测,实现了样品的三维信息提取,准确测得两钢钉的空间距离(24 mm)。文中提出的基于波导结构的太赫兹共焦成像系统具有结构紧凑,便携集成等优势,更适合于实际工程化应用。

1 实验系统搭建

基于波导结构的集成式太赫兹共焦成像系统,其原理图如图 1(a)所示:连续太赫兹源 S 频率为 97.6 GHz(TeraSense),输出信号功率为 95 mW,光斑形态为高斯型,偏振态为线偏。从太赫兹源天线输出后直接耦合到空心太赫兹波导 W 中,波导截面结构如图 1(b)所示,之前的研究表明该太赫兹波导具有较低的太赫兹传输损耗(0.015 cm⁻¹)^[18-19]。本征高阻硅片 45°角置于波导管中,用作太赫兹半透半反镜,在波导管末端,放置太赫兹平凸透镜 L,其焦距为 50 mm,为了确定经平凸透镜后太赫兹光束焦点位置,我们采用刀片法测量太赫兹光束的半高全宽值(FWHM)^[20],记录如图 1(c)所示,共计测量 20 个点,每次步进 3 mm,取半高全宽最小值为 3.37 mm,如图 1(d)所示,对应的位置即为透镜实际的焦距,所在平面即为实际焦平面,将待成像的样品置于此。

经样品反射后的太赫兹信号再次耦合至波导管中,经硅片反射至太赫兹探测端,同样地,采用刀片法测得探测端太赫兹光束 FWHM 最小值,即物方焦点的共轭点,在此处我们放置一金属针孔 P,以滤除物方焦平面以外的太赫兹信号,实现共焦探测的目的。紧贴金属针孔放置肖特基二极管太赫兹探测器 D(Virginia Diodes),将其探测到的太赫兹信号直接传输至高速数据采集卡(National Instruments)。系统的实物照片如图 1(e)所示,在成像过程中样品置于焦平面处保持不动,整个成像系统固定在三维电动平移台上,通过 LabVIEW 编写的上位机程序,联动控制平移台和采集卡,实现对样品的扫描成像。需要指出的是,如图 1(f)所示,成像系统中使用的太赫兹波导管、半透半反镜、平凸聚焦透镜、金属针孔等部件均集成在波导管中。其中太赫兹波导管和平凸透镜均由实验室 3D 打印(Ultimaker)完成,波导管的长度、透镜焦距等参数均可以根据实际应用需要加工制备。受限于三维平移台的大小,目前系统的整体尺

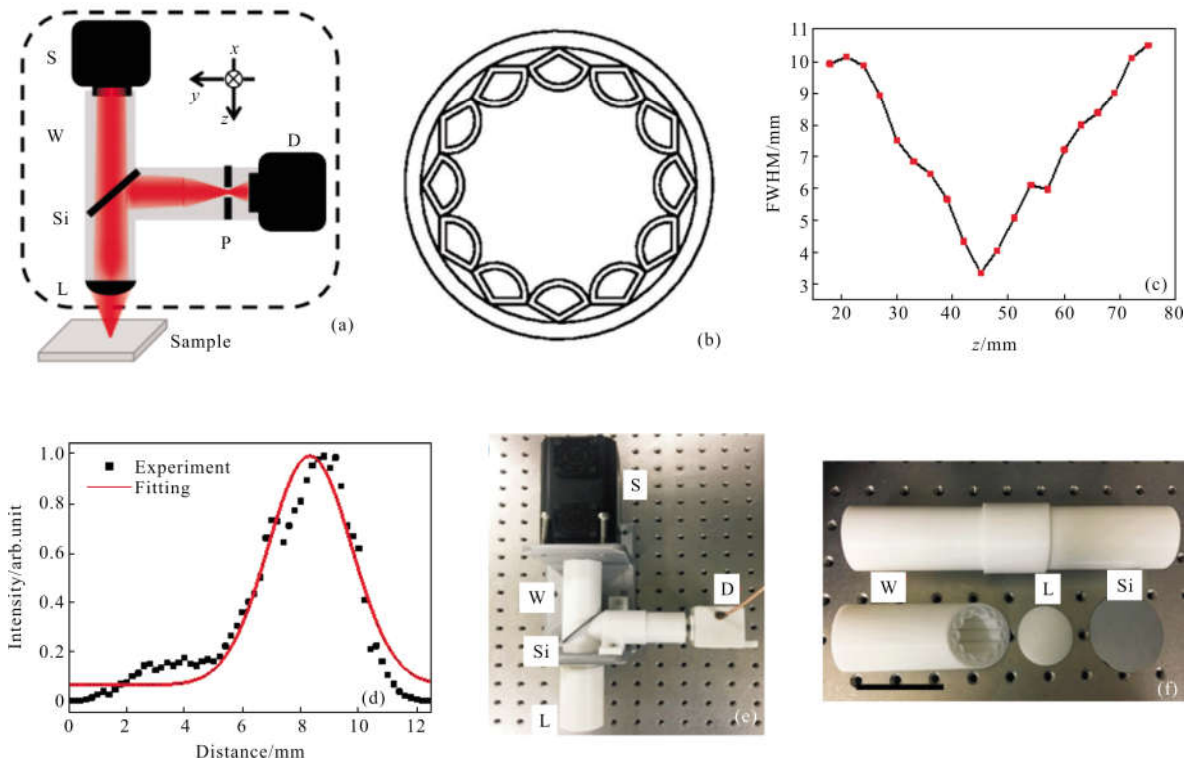


图 1 基于 3D 打印波导结构的集成式太赫兹波共焦成像系统及其各部分示意图

Fig.1 Schematic details of the integrated terahertz confocal imaging system based on 3D printed THz waveguides

寸为 300 mm×300 mm×300 mm，根据实际应用场景还可以进一步集成。

2 实验结果与分析

为了验证上述搭建系统的性能，首先将金属针孔完全打开，此时即为反射式太赫兹波成像系统。对隐藏于 100 mm 厚泡沫内的金属剃须刀片进行成像，结果如图 2(a)所示，其中刀片最小间隔约为 3 mm，表明系统能实现接近波长量级的横向分辨率。接下来，考虑一个实际应用场景，即用太赫兹反射式成像探测混凝土中的钢筋。当前，混凝土被广泛的应用于桥梁等工程建筑领域，为了提高混凝土机械强度，通常会在里面加入钢筋笼结构^[21]。许多安全事故的发生往往是由于钢筋的缺失或者是腐蚀导致的，因此，检测混凝土里面的钢筋状态具有十分重要的意义。如图 2(b)所示，采用该系统对混凝土的钢筋进行太赫兹反射成像，钢筋长度约为 30 mm，宽度约为 4 mm，插在混凝土内约 30 mm 深度处。通过文中技术能够清晰的呈现出钢筋的样貌。

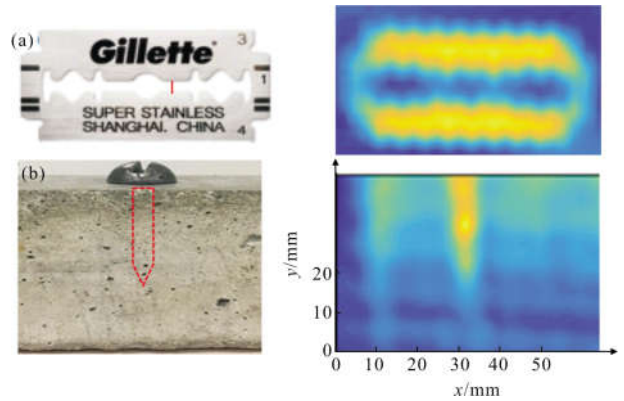


图 2 反射式太赫兹波成像系统

Fig.2 Reflection THz imaging system

进一步地，笔者将针金属针孔关闭至直径约为 3 mm，即与物方太赫兹焦点的大小相当，以滤除样品在焦平面以外反射回去的太赫兹信号，从而达到逐层探测的目的。为了验证共焦成像的效果，制作了如图 3(a)所示的样品：A 和 B 是金属钢钉，插在泡沫材料中。由于泡沫对太赫兹波是透明的，而金属对太赫兹波的反射率很高，因此能实现对钢钉的太赫兹

波反射成像。首先将 A 钉置于焦平面($z=0$),然后将成像系统沿着 z 方向每次步进 3 mm 进行 xy 二维扫描成像,结果如图 3(b)~(j)所示,由于刚开始 A 位于焦平面,所以图(b)能清晰地探测到 A 钉的样貌,随着

步进,A 钉逐渐远离焦平面,B 钉逐渐靠近焦平面,所以由图 (b)~(j)A 逐渐消失,B 逐渐显现。同时,还可以测得 A 钉与 B 钉的间距大约是 24 mm,与实际两钉间距~26 mm 符合较好。

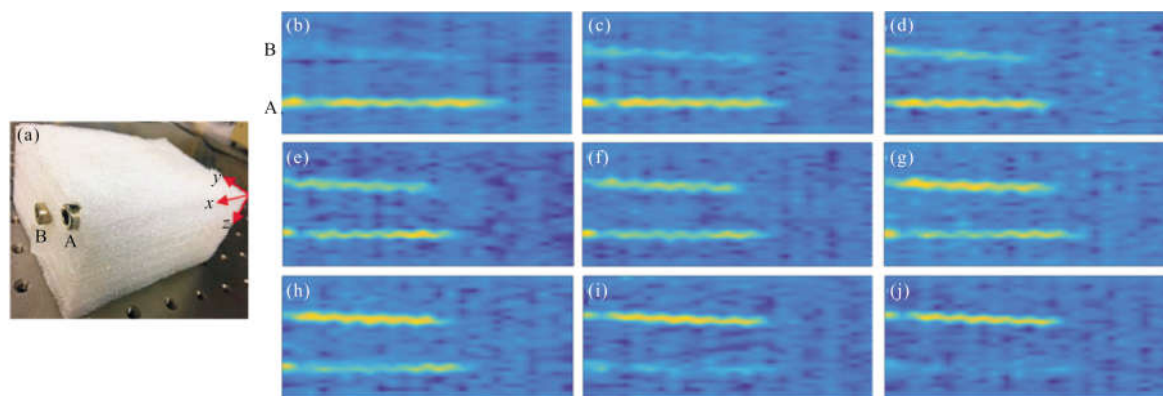


图 3 (a) 插有 A、B 钢钉泡沫的太赫兹共焦成像样品实物图;(b)~(j) 表示 A 与 B 钉的太赫兹共焦成像过程

Fig.3 (a) Physical map of THz confocal imaging with A and B steel nails foam; (b)~(j) confocal imaging process of A and B

3 结论

文中介绍了一种基于波导结构的太赫兹共焦成像系统。首先,搭建了一套集成的连续太赫兹波反射式成像系统,用金属刀片验证成像效果,结果表明该系统能实现接近波长量级(3 mm)的空间分辨率,接着,笔者对混凝土进行太赫兹成像,能够清晰地呈现出混凝土中的钢筋结构。在此基础上,通过在太赫兹探测器端引入金属针孔,构建共焦成像系统。实现对泡沫中两根钢钉的检测,且可以测得两钢钉的空间距离(24 mm)。文中提出的基于波导结构的太赫兹共焦成像系统具有结构紧凑,便携集成等优势,在建筑工程、安检等实际应用领域具有十分重要的意义。

参考文献:

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
 [2] Guo Lantao, Mu Kaijun, Deng Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 51-56. (in Chinese)
 郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 51-56.
 [3] Bi Lingzhi, Yuan Minghui, Zhu Yiming. Method of measuring steel bar in building by THz wave [J]. *Infrared*

and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0125003. (in Chinese)

毕凌志, 袁明辉, 朱亦鸣. 利用太赫兹波检测建筑物内钢筋的方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0125003.

[4] Song Q, Zhao Y, Redo-Sanchez A, et al. Fast continuous terahertz wave imaging system for security [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(10): 2019-2022.
 [5] Guo Lifan, Wang Xinke, Zhang Yan. Terahertz digital holographic imaging of biological tissues [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25 (3): 611-615. (in Chinese)
 郭力藩, 王新柯, 张岩. 生物组织的太赫兹数字全息成像[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 611-615.
 [6] Zhao H, Wang Y, Chen L, et al. High-sensitivity terahertz imaging of traumatic brain injury in a rat model [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2018, 23(3), 036015.
 [7] Kato M, Tripathi S R, Murate K, et al. Non-destructive drug inspection in covering materials using a terahertz spectral imaging system with injection-seeded terahertz parametric generation and detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6425.
 [8] Jie Qi, Yang Hongru, Li Hongguang, et al. Explosive identification based on terahertz time-domain spectral system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2392-2399. (in Chinese)
 解琪, 杨鸿儒, 李宏光, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的爆炸物识别[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2392-2399.

- [9] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(16): 1716.
- [10] Karpowicz N, Zhong H, Xu J, et al. Non-destructive sub-THz CW imaging[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2005, 5727: 132-142.
- [11] Ok G, Park K, Kim H J, et al. High-speed terahertz imaging toward food quality inspection [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1406.
- [12] Koch D C L, Jean -Paul G, Xue M, et al. Terahertz frequency modulated continuous wave imaging advanced data processing for art painting analysis[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5358.
- [13] Flammini M, Bonsi C, Ciano C, et al. Confocal terahertz imaging of ancient manuscripts [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, 38(4): 435-442.
- [14] Salhi M A, Pupeza I, Koch M. Confocal THz laser microscope [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2010, 31(3): 358-366.
- [15] Li Q, Zhou Y, Yang Y F, et al. 2.52 terahertz dual-axis reflection confocal scanning microscope [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2016, 33(4): 637.
- [16] Li Qi, Yang Yongfa, Hu Jiaqi. A composite algorithm used for terahertz confocal scanning image restoration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 321-326. (in Chinese) 李琦, 杨永发, 胡佳琦. 一种用于太赫兹共焦扫描图像复原的复合算法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 321-326.
- [17] Yang Jing, Gong Cheng, Zhao Jiayu, et al. Fabrication of terahertz device by 3D printing technology [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(1): 77-85. (in Chinese) 杨晶, 龚诚, 赵佳宇, 等. 利用 3D 打印技术制备太赫兹器件研究[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 77-85.
- [18] Li S, Dai Z, Wang Z, et al. A 0.1 THz low-loss 3D printed hollow waveguide [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, 176: 611-616.
- [19] Yang J, Zhao J, Gong C, et al. 3D printed low-loss THz waveguide based on Kagomé photonic crystal structure [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22454-22460.
- [20] Phing S H, Mazhorova A, Shalaby M, et al. Sub-wavelength terahertz beam profiling of a THz source via an all-optical knife-edge technique [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8551.
- [21] Cacciola M, Megali G, Diego Pellicanò, et al. Neuro-fuzzy approach for reconstructing fissures in concrete's reinforcing bars [C]//International Workshop on Fuzzy Logic & Applications. Beilin: Springer-Verlag, 2009.