DOI：10.19789/j.1004-9398.2024.02.004
文献引用：王一晨，王新柯，张岩．反射式太赫兹连续波线扫描成像系统[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2024，45（2）：36-42. WANG Y C，WANG X K，ZHANG Y. Reflective terahertz continuous wave linear array scanning imaging system[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2024，45（2）：36-42.

反射式太赫兹连续波线扫描成像系统*

王一晨，王新柯**，张　岩
（首都师范大学物理系，超材料与器件北京市重点实验室，北京　100048）

摘要：利用太赫兹线阵探测器和0.3 THz辐射源，搭建了反射式太赫兹连续波线扫描成像系统。通过双次扫描测量和图像线性叠加可以对样品反射的太赫兹图像进行精准测量，成像分辨率达到2 mm，成像面积达到40 mm×40 mm，测量耗时<3.0 min。利用此系统对隐蔽在信封和纺织物中的金属样品进行了成功识别，对预埋在聚乙烯板和泡沫塑料板内的异物进行了精准定位。实验结果验证，此系统可以对隐蔽在电介质材料中的物体进行快速准确地检测，表明了其在安全检查和无损探伤领域的应用价值。

关键词：太赫兹成像；反射式；线扫描
中图分类号：O439；TN29　　**文献标志码**：A

Reflective terahertz continuous wave linear array scanning imaging system*

WANG Yichen，WANG Xinke**，ZHANG Yan
（Beijing Key Laboratory of Metamaterials and Devices，Department of Physics，Capital Normal University，Beijing　100048）

Abstract：Utilizing a terahertz（THz）linear array detector and a 0.3 THz radiation source，a reflective THz continuous wave linear array scanning imaging system was built. Using the imaging system，THz images reflected by samples could be accurately measured with double scan measurements and an image linear superposition. The imaging resolution and the measurement region could approach 2 mm and 40 mm×40 mm with 3.0 min of the time consumption. Taking advantage of this system，the metallic samples hidden by envelopes and textiles were successively identified. In addition，the foreign matters embedded in polyethylene and plastic foam plates were exactly discerned. The experimental results demonstrated that objects concealed by dielectric materials can be quickly and precisely inspected by the imaging system，which indicated its application values in security inspection and non-destructive testing.

Keywords：terahertz imaging；reflective mode；linear array scanning
CLC：O439；TN29　　**DC**：A

收稿日期：2023-09-28
* 国家自然科学基金面上项目（62275175）
** 通信作者：wxk82721@cun.edu.cn

0 引 言

太赫兹辐射(THz,1 THz=10^{12} Hz)属于远红外波段,由于具有单光子能量低、透射性高与极性分子反应强烈等独特优势,相关的太赫兹光谱与成像技术已经在工业应用和基础研究领域得到了广泛关注[1-4]。当前常见的太赫兹成像技术根据辐射源分类,可以分为太赫兹脉冲成像与太赫兹连续波成像,二者各有利弊。其中,太赫兹脉冲成像可以获取物质每个空间位置处的太赫兹光谱信息,对于分析物质的物理化学性质具有独特优势,因此被广泛应用于半导体光电特性表征[5-8]、生物组织病变诊断[9-11]和食品药品质量控制[12-14]等领域。然而,由于太赫兹脉冲成像存在着光学系统体积庞大且沉重,以及测量耗时过长等问题,因此暂时难以应用于工业级别的检测之中。相比而言,太赫兹连续波成像仅能获取待测样品的单频信息,但是由于其具有光学系统简单、操作便捷、测量耗时短和抗干扰性强等优点,可以很方便地应用于工业检测之中。特别是,由于很多非极性电介质材料在太赫兹波段是透明的,使得太赫兹连续波成像在安全检查和无损探伤等领域具有极高的应用价值,与X射线、近红外和超声波等成像技术形成了有效互补。

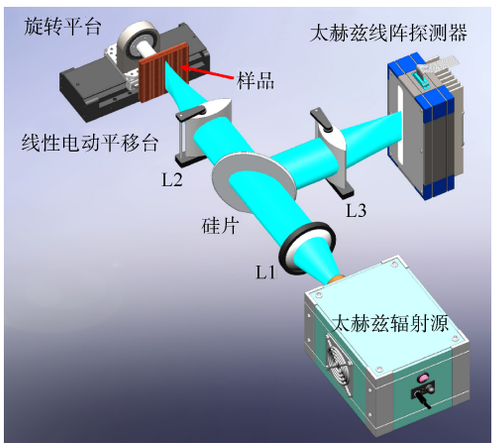
目前,太赫兹连续波成像在安全检查和无损探伤等相关领域的应用已经有了诸多报道。2008年,袁宏阳等[15]搭建了基于返波管的太赫兹连续波成像系统,利用热释电探测器测量透射太赫兹信号,实现了对打孔铝板、公交卡、校园卡内部结构的识别,以及完成了对隐藏在信封内硬币等物体和信封内纸片上铅笔字迹的成像;2012年,Lee等[16]利用固态振荡器和倍频器作为0.2 THz辐射源,搭建了透射式太赫兹连续波成像系统,成功检测出嵌入方便面样品中各种大小的异物;2019年,王彪等[17]利用0.3 THz辐射源和线阵探测器搭建了透射式太赫兹线扫描成像系统,实现了对聚乙烯板材和水管内部缺陷的快速检测,并完成了对装在信封中剪刀和小刀的成像;2020年,武丽敏等[18]采用频率为2.52 THz的CO_2激光泵浦连续太赫兹激光器以及高莱探测器,搭建反射式太赫兹连续波成像系统,完成了小鼠皮下乳腺癌模型反射成像,成像结果可清晰地识别乳腺癌区域。

本文利用0.3 THz辐射源和线阵探测器,搭建了一套反射式太赫兹连续波线扫描成像系统,通过双次扫描测量和图像线性叠加,实现了对样品形貌快速准确地检测。通过对成像系统的性能进行测试和分析,表明系统具有2 mm级别的成像分辨率,并且仅需要2.0~3.0 min就可以准确测量由样品反射的太赫兹图像,成像面积可达到40 mm×40 mm。利用此系统进行隐蔽物成像和非侵入式检测实验,可以清晰地观测到隐蔽在金属样品和电介质板材中的异物,验证了此系统对于安全检查和无损探伤的应用价值。

1 实验系统及性能

反射式太赫兹连续波线扫描成像系统的光路如图1所示,所采用的太赫兹源为0.3 THz辐射源(300 GHz,Terasense公司),其输出功率约为14 mW,输出头配备增益为19 dB的喇叭天线,远场发散角约为10°。利用焦距为100 mm的高密度聚乙烯球透镜(L1)对太赫兹光束进行准直,准直后的太赫兹光斑直径约为40 mm。利用焦距为50 mm的高阻硅柱透镜(L2,电阻率>10 000 Ω·cm)对太赫兹光束进行聚焦,在焦平面处太赫兹光束形成焦线。样品被置于太赫兹焦线附近,其安装在一个旋转平台和一个线性电动平台上。线性电动平台的作用是驱动样品水平移动,以保证太赫兹焦线对样品一个维度的信息进行扫描测量,旋转平台的作用是使样品旋转90°,同时通过线性电动平台的移动,保证太赫兹焦线对样品另一个维度的信息进行测量。由样品表面原路反射的太赫兹光束通过透镜L2后被重新准直,并利用一个高阻硅片(电阻率>10 000 Ω·cm)将其反射至探测模块。由硅片反射的太赫兹光束通过焦距为50 mm的高阻硅柱透镜(L3)后被重新聚焦,并由太赫兹线阵探测器(300 GHz,Terasense公司)进行接收。其中,样品至透镜L2、透镜L2至硅片、硅片至透镜L3和透镜L3至线阵探测器形成了4f系统,由此将样品的一维信息进行了记录。在实验测量过程中,样品尽量与旋转平台共轴安装,首先通过连续调整线性电动平台的位置记录样品一维图像信息,再将样品原位旋转90°后进行二次扫描,记录样品另一维信息,将2幅图像进行线性叠加重建样品完整信息。

首先,为了测试成像系统的性能,将太赫兹线阵探测器安装在线性电动平台上,并置于太赫兹焦线位置。横向移动线阵探测器位置,对太赫兹焦线



注:L1~L3表示透镜。

图1　反射式太赫兹连续波线扫描成像系统

的分布形态进行扫描测量,测量结果如图2所示。选定太赫兹焦线中心为X=0,平移台移动范围X为−10.0~10.0 mm,移动步长为0.5 mm。同时,线阵探测器的像素数目为1×256,单一像素尺寸为0.5 mm,仅截取包含太赫兹焦线的区域进行展示,即Y为−20.0~20.0 mm。图2(a)展示了太赫兹焦线图像,可以看出其呈现了典型的焦线光斑分布特点,仅在X维度上存在聚焦效果,焦线在Y维度上的尺寸约为40 mm。在Y=0位置,沿X轴截取太赫兹焦线的横向包络线,图2(b)展示了包络线的归一化曲线,根据包络线的半高全宽判定其X方向的光斑直径约为2.5 mm。为了验证此系统的成像能力,选定了一个金属字母"A"作为测试样品,如图2(c)所示,其尺寸为29 mm×30 mm,线条宽度为6 mm,厚度为2 mm。将样品共轴安装在旋转平台上,根据上述成像方法对其进行2个维度的二次扫描测量,扫描步长仍保持0.5 mm,实验结果如图2(d、e)所示。图2(d)展示了本系统对字母A沿X方向的扫描结果,可以看到由于字母A上的左右2条斜线主要呈现出沿X维度的信息变化,因此系统可以将其准确地检测出来。字母A中间横线部分主要包含了沿Y维度的信息变化,但是系统在扫描过程中并不对Y方向的信息进行成像,在线阵探测器记录时由于很强的衍射效应,横线部分反射的太赫兹信号强度十分微弱,因此无法呈现在检测结果中。随后,将样品共轴旋转90°后进行二次扫描,同时为了最后的图像融合,将成像结果进行90°逆旋转并截取了相同的成像区域,结果如图2(e)所示。图2(e)呈现了对字母A沿Y方向的扫描结果,可以看到在本次扫描中将字母A的横线部分进行了准确重现,而字母A的左右2条斜线部分难以观测,仅在2条斜线的顶部交汇处(Y=−10.0 mm附近)存在微弱的

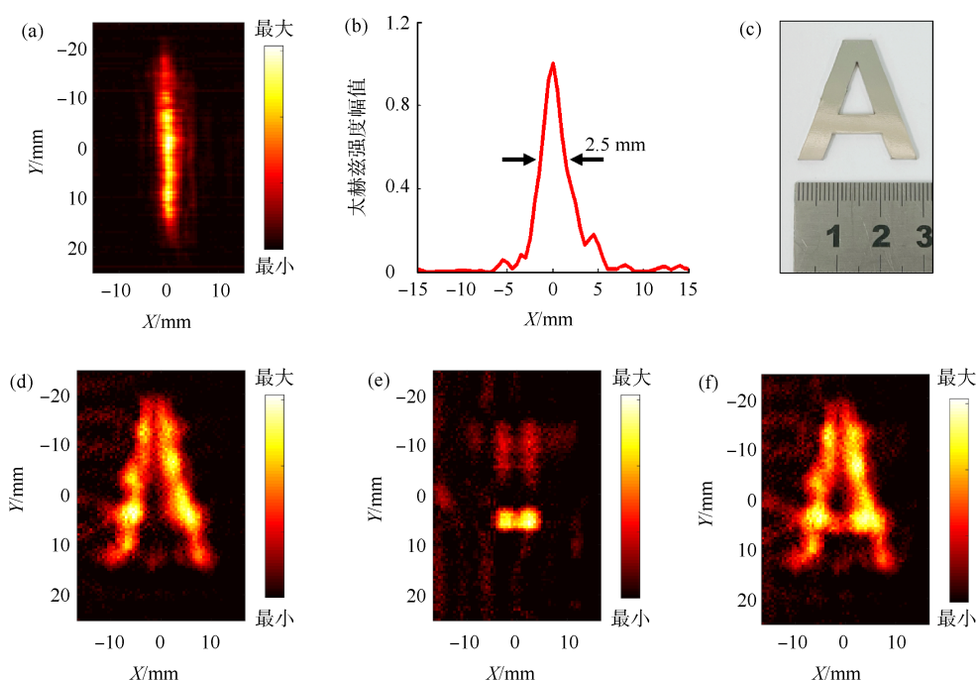


图2　反射式太赫兹连续波线扫描成像系统的性能测试

(a)焦平面位置处太赫兹焦线;(b)太赫兹焦线的横向包络线;(c)测试样品金属字母"A";(d~f)分别为测试样品在2个维度上的线扫描成像以及二者的融合

强度分布。当将2次扫描的图像进行线性叠加时,就可以完整地重建样品的整体信息,如图2(f)所示,字母A的二维分布可以被清晰地观测。由于系统每次一维扫描需要耗时约60 s,而样品的旋转和图像处理耗时<10 s,因此完成一次完整的成像需要耗时约130 s。至此,本文验证了本系统的成像能力,通过2次扫描和图像线性叠加的方式,系统可以对待测样品实现反射式的线扫描成像,快速准确地呈现样品的形貌特征。

为了准确测定成像系统的分辨率,本文制作了4组不同周期的分辨率测试卡,如图3(a)所示,测试卡材质是表面镀铝的聚对苯二甲酸类塑料(表面电导率为2.9×10^{8} s/m),每组测试卡的长度均为10 mm,周期分别为2、4、6和8 mm,占空比均为50%,4组测试卡贴在SiO_2基底上(电导率为1×10^{-18} s/m)。由于只关注测试卡的一维信息,因此将样品安装在太赫兹焦线处,以0.5 mm的步长对其进行一维扫描测量,实验结果如图3(b~f)所示。对于周期为4、6和8 mm的测试卡,成像系统都可以清晰地分辨其形貌特征。对于周期为2 mm的测试卡,由于其精细结构已经达到了系统的分辨极限,系统仅能勉强分辨测试卡的形态,同时由于测试卡的线条宽度仅为1 mm,小于太赫兹焦线直径,致使反射的太赫兹强度较弱,图像的信噪比较低。每幅图像中,在Y=0位置附近,分别选取了10条沿X轴的图像数据进行求和归一,获取了沿X轴的横向包络线,图3(d)展示了4个分辨率测试卡太赫兹图像的横向包络线。由图可知,周期为4、6和8 mm的线条间隙都可以清晰地分辨。同时,随着线条间隙的减小,线条边缘与太赫兹焦线的卷积效应也更为明显。因此,随着测试卡的周期从8 mm减小到4 mm,线条的包络线逐渐从矩形形态向三角形形态转化。对于周期为2 mm的测试卡,可以看到相邻线条包络线几乎相互重叠,仅能大致分辨样品的结构信息。至此,表明了本系统可以达到2 mm的分辨极限。

针对本系统的分辨率极限,根据光学系统艾里斑半径公式$\sigma = 1.22\times\lambda\times f/D$,式中$\lambda$为光源波长,$f$为透镜焦距,$D$为透镜孔径或入射光斑直径,可以计算出照射到样品上的太赫兹焦斑半径σ约为1.53 mm。实验测得的分辨率要略低于理论计算结果,考虑此差异主要是由于照射到硅柱透镜表面的准直太赫兹光束并不是理想的平面波,而是高斯分布形态,这在一定程度上降低了系统的分辨能力。另外,探测器的采样率也影响着系统的分辨能力,本系统采用的太赫兹线阵探测器,其单像素尺寸仅为0.5 mm。综合这些因素,本系统目前能达到的分辨率为

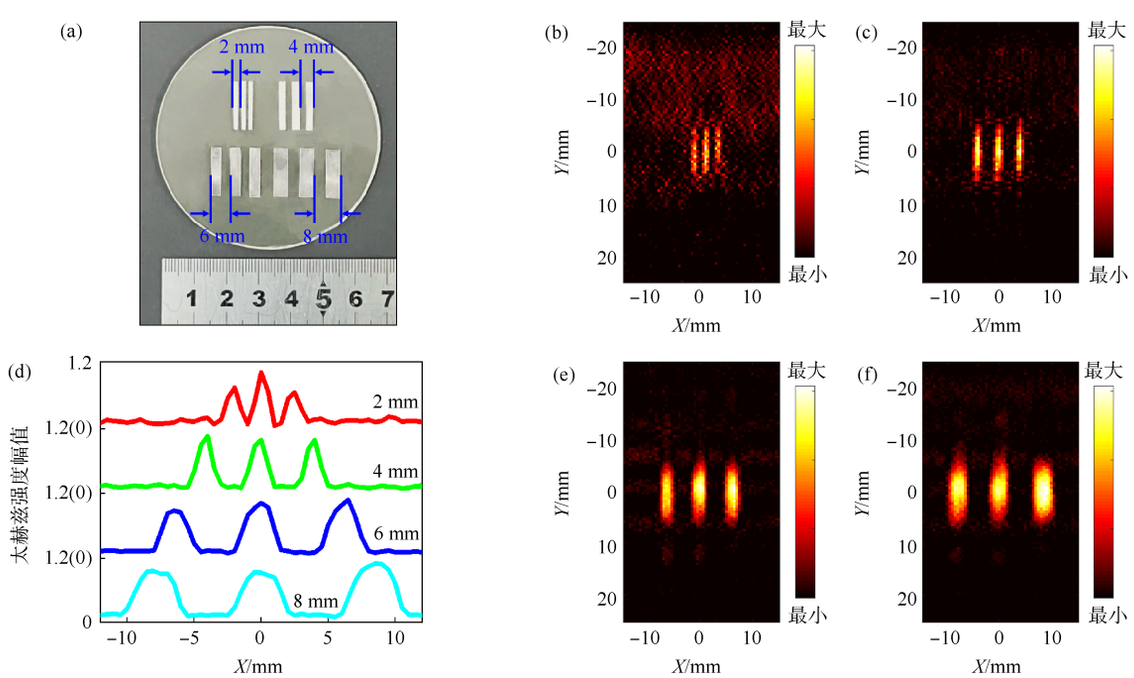


图3　成像系统的分辨率测试

(a)分辨率测试卡照片;(b、c、e和f)周期分别为2、4、6和8 mm测试卡的太赫兹图;(d)不同周期测试卡太赫兹图的横向包络线

2 mm。在系统性能的进一步改进中,考虑可以采用一些特殊的衍射光学元件或超表面器件对太赫兹准直和聚焦光束进行优化,形成质量更好的太赫兹焦斑来提升系统分辨率,并且随着太赫兹技术的不断发展,采用采样率更好并且更加灵敏的太赫兹探测器也会进一步提升系统分辨率。

2　成像结果及分析

2.1　隐蔽物成像

由于太赫兹辐射对于非极性物质具有很高的透射性,很多包装材料(如信封、纺织物等)在太赫兹波段都具有很好的透明性,因此配备太赫兹辐射源的隐蔽物检测设备已经在安全检查领域体现了重要的应用价值[19-22]。本文测试了所建立的成像系统对于隐蔽物的检测能力。如图4(a、e)所示,制备了2个金属字"首"和"师",其尺寸分别为29 mm×30 mm和31 mm×28 mm,线条宽度为4 mm,厚度为2 mm。将2个金属字放置在快递信封之中,从外观上无法识别信封内物体形态。按照上述所描述的实验方法,利用反射式太赫兹连续波线扫描成像系统对2个样品进行测量,每次测量耗时约为3 min,实验结果如图4(b、f)所示。虽然有快递信封的包裹,导致图像信噪比受到一定的影响,但是仍然可以从图中清晰地观测出2个金属字的分布形态。采用相同的测试方法,本实验也测量了2个被无纺布包裹的金属字母"W"和"Y"的太赫兹图像。样品的照片如图4(c、g)所示,2个金属字母的尺寸分别为37 mm×28 mm和25 mm×29 mm,线条宽度为6 mm,厚度为2 mm,用蓝色无纺布对其进行包裹。利用所搭建的成像系统对2个样品进行线扫描测量,成像结果如图4(d、h)所示。可以观察到,即使在无纺布的包裹下,2个字母的特征仍然可以从太赫兹图像中准确地识别出来。由此证明了此成像系统对于隐蔽物的检测能力,展示了此系统在安全检查和危险物品检测方面具有较好的应用价值。

2.2　非侵入式检测

由于太赫兹辐射对于非极性物质的高透射性,太赫兹检测设备也经常用于对各种封装材料或建筑材料的内部缺陷进行非侵入式探伤[23-25]。本文测试了利用此成像系统对聚乙烯板和泡沫塑料板内部预埋异物的检测效果。如图5(a、c)所示,在2块聚乙烯板之间固定了一个"十"型硬纸壳来模拟聚乙烯板内部的异物,以及在2块泡沫塑料板之间固定了一个"口"型硬纸壳来模拟泡沫塑料板内部的异物。2个异物的尺寸分别为13 mm×13 mm和14 mm×13 mm,线条宽度为5 mm,厚度为0.5 mm。利用太赫兹连续波线扫描成像系统对2个样品进行测量,为提高图像质量,在样品背后固定一块金属板提高对太赫兹信号的反射率,每个样品的检测耗时约为3.0 min,实验结果如图5(b、d)所示。由于异物对太赫兹波造成了较强的散射和吸收,导致异物

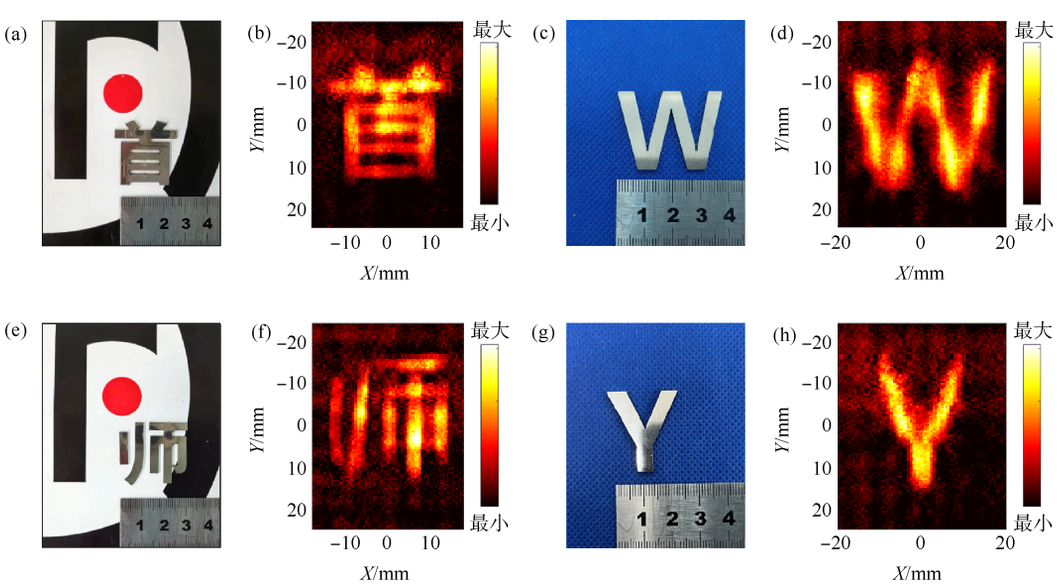


图4　对隐蔽在信封和纺织物中的金属样品进行隐蔽物成像
(a、e)快递信封中的金属字"首""师";(b、f)金属字的线扫描成像结果;
(c、g)无纺布包裹的金属字母"W""Y";(d、h)金属字母的线扫描成像结果

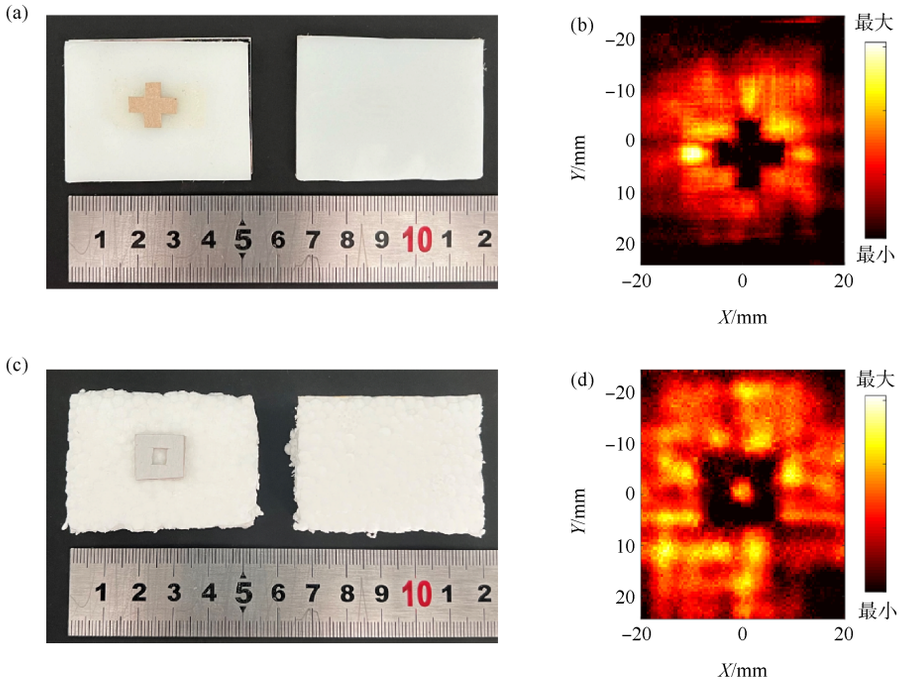


图5　对聚乙烯板和泡沫塑料板中存在的异物进行非侵入式检测

(a)2块聚乙烯板之间预埋“十”型硬纸壳异物;(b)聚乙烯板内异物的线扫描成像结果;
(c)2块泡沫塑料板之间预埋“口”型硬纸壳异物;(d)泡沫塑料板内异物的线扫描成像结果

位置的太赫兹反射信号强度明显减弱,2个样品的太赫兹图像都清晰地呈现了2个异物的准确位置和分布形态。实验结果展示了此系统对于封装材料和建筑材料内部的异物具有较高的检测能力,在无损探伤领域具有一定的实用价值。

2.3　成像系统的性能比较

通过查阅已发表的部分文献[18,26-27],在表1中比较了几个反射式太赫兹连续波成像系统与本成像系统的性能,包括测量耗时、成像面积和分辨率。通过表1可知,系统的分辨率越高,对应的扫描时间就会越长,同时成像面积也受到一定限制。本文所采用的线扫描方式,虽然在分辨率上有一定损失,但是获得了更快的扫描速度和更大的成像面积,更符合工业检测的需求。综合来看,本成像系统在安全检测和无损探伤等领域具有更大的实用价值。

表1　不同太赫兹成像系统的性能比较

成像系统	测量耗时/min	成像面积/(mm×mm)	分辨率/mm
文献[18]	22.5	30×18	0.60
文献[26]	40.0	14×14	0.40
文献[27]	24.0	24×24	0.46
本文	3.0	40×40	2.00

3　结　论

本文利用0.3 THz辐射源和太赫兹线阵探测器搭建了反射式太赫兹连续波线扫描成像系统,实现了对物体反射太赫兹图像的快速准确测量。通过进行隐蔽物成像和非侵入式检测实验,利用此成像系统实现了对隐藏在信封和纺织物中金属样品的识别,以及实现了对预埋在聚乙烯板和泡沫塑料板内异物的定位。此成像系统在反射测量模式下,可以实现2 mm的成像分辨率,成像面积可达40 mm×40 mm,实验耗时<3.0 min。通过与之前报道的太赫兹连续波成像系统相比较,表明由于采用了线扫描的测量模式,虽然在分辨率上有一定损失,但是大大减少了实验耗时,使得此系统在安全检查和无损探伤等领域体现了很好的实用性。在未来的改进中,将进一步提高系统检测精度,扩大检测面积,简化检测步骤,缩短测量耗时,完成可实用化的太赫兹检测系统。

参 考 文 献

[1] GUERBOUKHA H,NALLAPPAN K,SKOROBOGATIY M. Toward real-time terahertz imaging[J]. Advances in Optics and Photonics,2018,10(4):843-938.

[2] SHEN Y C. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging

for pharmaceutical applications: a review [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2011, 417(1/2): 48-60.

[3] CHEN X, LINDLEY-HATCHER H, STANTCHEV R I, et al. Terahertz (THz) biophotonics technology: instrumentation, techniques, and biomedical applications [J]. Chemical Physics Reviews, 2022, 3(1): 011311.

[4] MITTLEMAN D M. Perspective: terahertz science and technology [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(23): 230901.

[5] AGHAMIRI N A, HUTH F, HUBER A J, et al. Hyperspectral time-domain terahertz nano-imaging [J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24231-24242.

[6] MOON K, DO Y, PARK H, et al. Computed terahertz near-field mapping of molecular resonances of lactose stereo-isomer impurities with sub-attomole sensitivity [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16915.

[7] GIORDANO M C, STEFAN M, CLEMENS L, et al. Phase-resolved terahertz self-detection near-field microscopy [J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18423-18435.

[8] WENG Q, KOMIYAMA S, YANG L, et al. Imaging of nonlocal hot-electron energy dissipation via shot noise [J]. Science, 2018, 360(6390): 775-778.

[9] HOSHINA H, HAYASHI A, MIYOSHI N, et al. Terahertz pulsed imaging of frozen biological tissues [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(12): 123.

[10] FITZGERALD A J, WALLACE V P, JIMENEZ-LINAN M, et al. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors [J]. Radiology, 2006, 239(2): 533-540.

[11] WALLACE V P, FITZGERALD A J, SHANKAR S, et al. Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma ex vivo and in vivo [J]. British Journal of Dermatology, 2004, 151(2): 424-432.

[12] HO L, CUPPOK Y, MUSCHERT S, et al. Effects of film coating thickness and drug layer uniformity on in vitro drug release from sustained-release coated pellets: a case study using terahertz pulsed imaging [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2009, 382(1/2): 151-159.

[13] FENG C H, OTANI C. Terahertz spectroscopy technology as an innovative technique for food: current state-of-the-Art research advances [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(15): 2523-2543.

[14] GOWEN A A, O'SULLIVAN C, O'DONNELL C P. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: emerging techniques for food process monitoring and quality control [J]. Trends in Food Science & Technology, 2012, 25(1): 40-46.

[15] 袁宏阳,葛新浩,焦月英,等.基于BWO连续太赫兹波成像系统的无损检测[J].应用光学,2008,29(6):5.

[16] LEE Y K, CHOI S W, HAN S T, et al. Detection of foreign bodies in foods using continuous wave terahertz imaging [J]. Journal of Food Protection, 2012, 75(1): 179-183.

[17] 王彪,王新柯,俞跃,等.太赫兹线阵快速扫描成像[J].中国激光,2019,46(6):0614029.

[18] 武丽敏,廖彬,徐德刚,等.小鼠在体皮下乳腺癌的太赫兹波成像检测研究[J].红外与毫米波学报,2020,39(5):8.

[19] STANTCHEV R I, SUN B, HORNETT S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector [J]. Science Advances, 2016, 2(6): e1600190.

[20] CREEDEN D, MCCARTHY J C, KETTERIDGE P A, et al. Compact, high average power, fiber-pumped terahertz source for active real-time imaging of concealed objects [J]. Optics Express, 2007, 15(10): 6478-6483.

[21] STRĄG M, ŚWIDERSKI W. Non-destructive inspection of military-designated composite materials with the use of terahertz imaging [J]. Composite Structures, 2023, 306: 116588.

[22] SHCHEPETILNIKOV A V, GUSIKHIN P A, MURAVEV V M, et al. New ultra-fast sub-terahertz linear scanner for postal security screening [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2020, 41(6): 655-664.

[23] AHI K, SHAHBAZMOHAMADI S, ASADIZANJANI N. Quality control and authentication of packaged integrated circuits using enhanced-spatial-resolution terahertz time-domain spectroscopy and imaging [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 104: 274-284.

[24] ABINA A, PUC U, JEGLIČ A, et al. Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging [J]. NDT & E International, 2016, 77: 11-18.

[25] KIM H S, PARK D W, OH G H, et al. Non-destructive evaluation of cement hydration with pulsed and continuous terahertz electro-magnetic waves [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 138: 106414.

[26] 李琦,丁胜晖,姚睿,等.隐藏物的连续太赫兹反射扫描成像实验[J].中国激光,2012,39(8):811001.

[27] 王与烨,李海滨,王泽龙,等.大鼠冲击性脑创伤的太赫兹波成像检测[J].光学学报,2022,42(10):1017001.

(责任编辑:兰丽丽)