

基于太赫兹量子级联激光器的反射式快速扫描成像

李孟奇^{1,2}, 谭智勇¹, 邱付成¹, 万文坚¹, 王 长¹, 曹俊诚^{1,2}

¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050;

²上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210

摘要 以太赫兹 (THz) 量子级联激光器为光源、低温热辐射计为信号接收端, 采用可旋转和平移的二维扫描平台搭建反射式快速扫描成像系统。通过计算机控制扫描平台进行连续的旋转与平移运动, 实时获取探测信号强度和样品位置信息, 成功实现对直径为 80 mm 圆形区域的快速扫描成像, 扫描时间为 5 s, 图像的平均空间分辨率约为 1 mm, 系统成像时间大幅缩短。此外, 成像装置中基于 THz 分束片的共光路设计, 可有效减少系统光路元件, 进一步缩小成像系统的体积。

关键词 成像系统; 太赫兹; 反射成像; 太赫兹量子级联激光器; 旋转平移二维扫描; 共光路

中图分类号 TN29 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0611004

Fast Reflective Scanning Imaging Based on Terahertz Quantum-Cascade Laser

Li Mengqi^{1,2}, Tan Zhiyong¹, Qiu Fucheng¹, Wan Wenjian¹, Wang Chang¹, Cao Juncheng^{1,2}

¹Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

²School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

Abstract A fast reflective scanning imaging system is constructed by employing the terahertz (THz) quantum-cascade laser as the light source and the low-temperature bolometer as the signal receiver. A rotational and translational platform is used in this imaging system to realize fast scanning. The fast imaging process of a circle area with a diameter of 80 mm is demonstrated by a computer controlling the scanning platform to carry out the rotational and translational motion. The signal intensity and the related 2D sample position are acquired simultaneously. By the imaging system, the scanning time is 5 s and the spatial resolution of the obtained image is 1 mm, which greatly shortens the imaging time. Furthermore, the optical components are reduced effectively by the co-optical path design based on THz beam splitters, which reduces the size of the THz imaging system.

Key words imaging system; terahertz; reflective imaging; terahertz quantum-cascade laser; rotating and translating two-dimensional scanning; co-optical path

OCIS codes 110.6795; 140.5965; 040.5160

1 引 言

太赫兹 (THz) 辐射通常是指频率在 0.1~10 THz (波长为 30~3000 μm) 之间的电磁波, 是介于毫米波和红外光之间频谱范围相当宽的电磁波, 在电磁波谱中处于电子学向光子学过渡的特殊位置^[1], 在波谱分

收稿日期: 2017-01-20; 收到修改稿日期: 2017-02-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2014CB339803)、国家重大科学仪器设备开发专项 (2011YQ150021)、国家自然科学基金 (61405233)、上海市科学技术委员会项目 (15DZ0500103, 17ZR1448300, 14530711300)

作者简介: 李孟奇 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹二维扫描成像系统方面的研究。

E-mail: limq@shanghaitech.edu.cn

导师简介: 曹俊诚 (1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事太赫兹物理、器件及应用等方面的研究。

E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn (通信联系人)

析^[2]、安全检查^[3]、医疗诊断^[4]和空间探测^[5]等领域都有着很好的应用前景。THz 波对非极性材料具有较好的穿透性,能够探测隐藏的违禁品 THz 光子能量小,不会引起生物组织的光致电离,适合于生物医学成像;THz 辐射成像分辨率高,成像对比度和均匀性好,对塑料、陶瓷、泡沫等材料以及毒品和生物制剂等较为敏感,能有效地鉴别多种常规手段无法识别的伪装和隐形。人们越来越频繁的出行致使火车站、飞机场等重要公共场所的安检压力迅速增加,急需一种快速、便捷的成像手段,以加快安检的速度,缓解重要公共场所的安检压力。因此,发展 THz 成像技术在公共安全等领域具有重要意义。

根据源的工作方式,THz 成像可以分为连续波成像和脉冲成像。连续波成像技术具有成像时间短、成像质量好和操作方便等优点。但对于 THz 量子级联激光器(THz QCL)来说,连续的工作不利于热量的散失,导致输出功率降低。根据成像手段的不同,THz 成像可分为主动成像和被动成像,即有源成像和无源成像。根据对样品的成像方式,主动成像又可分为透射成像和反射成像。1995 年,Hu 等^[6]第一次实现 THz 成像。该成像系统基于光电 THz 时域光谱技术(THz TDS),对 $4.5\text{ cm} \times 2.3\text{ cm}$ 的树叶成像,图像大小为 3×10^4 pixel,扫描速度为 12 pixel/s,频谱分辨率为 0.02 THz,空间分辨率为 0.25 mm。2008 年,Zhang 等^[7]利用电光晶体和 CCD 实现实时成像。这种成像方式的成像速度快,但由于光学衍射和干涉的影响,成像结果会出现水波纹,成像效果远不如扫描成像效果。所以,扫描成像仍是 THz 成像的重要部分。在本文实验中,利用 THz QCL 作为扫描成像的发射源,与文献[8-9]中同样利用 QCL 进行成像的研究结果进行了比较。2012 年,Zhou 等^[8]利用出射频率为 3.90 THz 的 QCL 和响应峰值为 3.2 THz 的量子阱探测器(QWP)对金属钥匙进行成像,扫描范围为 $25\text{ mm} \times 45\text{ mm}$,图像大小为 1125 pixel,成像时间为 30 min。2013 年,Tan 等^[9]利用 THz QCL 和 THz QWP 对人民币进行透射成像。扫描范围为 $33\text{ mm} \times 52\text{ mm}$ 的人民币水印,图像大小为 7035 pixel,空间分辨率为 0.5 mm,成像总时长大约 3 h。从文献[8-9]可以看出,在 THz 成像技术中,成像质量和成像时间是两个需要重点解决的关键技术问题。阵列成像虽然可以快速成像,但由于受到阵列像素的限制,无法获得高质量的 THz 图像;扫描成像可以获得高质量的成像结果,但扫描速度慢使其成像时间过长。常规的 THz 扫描成像通常都是采用二维直线平移台逐点扫描的成像方式,移动 1 个步长,进行 1 次数据采集。因此,平移台的变速运动成为扫描时间受到限制的重要原因;同时平移台的往复运动可能存在齿距误差,也会对成像质量造成影响。针对二维平移台扫描时间长的缺点,本文利用可旋转和平移的二维平移台作为机械扫描装置,与常规的扫描方式不同,扫描装置在成像全过程中连续且匀速运动,扫描时间短,成像质量好^[10]。

随着 THz QCL 性能的不不断提高,基于 THz QCL 的成像研究获得快速发展。利用 THz QCL 成像在空间分辨率和时间分辨率等方面具有独特的优势,成像的空间分辨率可小于 $300\ \mu\text{m}$ ^[11]。本文提出基于 THz QCL 的反射式逐点扫描快速成像系统来获得较高空间分辨率的成像结果;利用旋转台旋转的连续性,通过计算机控制扫描装置的连续运动并同步采集信号,有效地缩短成像时间,而且结构简单,无需延迟装置与停顿扫描。实验中分别对无遮挡的牙签和藏匿在黑色聚乙烯塑料袋下的牙签扫描成像,获得分辨率高、对比度明显和耗时短的扫描图像。

2 反射式 THz 快速成像系统的组成及工作原理

2.1 成像系统的组成

整个系统处于开放的实验环境,环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度约为 40%。实验中采用基于 GaAs/AlGaAs 材料体系的 THz QCL,有源区采用分子束外延技术在半绝缘 GaAs/AlGaAs 衬底上生长,为四阱共振声子结构^[6],波导结构为单面金属波导,发射的 THz 波频点为 4.3 THz,工作温度为 10 K,输出的平均功率为 0.8 mW。器件采用脉冲工作模式,电源驱动占空比为 1%。探测器采用热辐射计^[7-8],响应速率为 0.025 s,探测频率范围为 0.15 ~ 20 THz。

实验主要采用可旋转和平移的二维平移台作为机械扫描装置,成像方式为反射式成像,THz 快速成像实验装置如图 1 所示。THz 快速成像系统包括 THz QCL、载物台(即可旋转和平移的二维平移台)、传输会聚光路系统、热辐射计(即探测器)、信号采集处理模块和同步控制及图像显示模块。传输会聚光路系统中所用的抛物面镜的直径为 76 mm,焦距为 127 mm;分束镜的直径为 76 mm,作为载物台的反光镜尺寸为

100 mm×100 mm。THz QCL 向外辐射 THz 波,首先经光路系统的抛物镜 1 会聚,然后透过分束镜平行传输至抛物镜 2,抛物镜 2 将 THz 波会聚为点光源打在载物台的待测物体上;根据光路可逆的原理,THz 波反射并按原路再次会聚、传输,到达分束镜时一部分 THz 波透射回到激光器,另一部分反射到达探测器表面,被探测器记录激光强度信息。因为待测物体不同位置对激光的反射和吸收强度不同,所以探测器记录的强度信息也就不同。探测器将接收到激光强度信息转换为电信号并发送至信号采集处理模块中的数据采集卡。数据采集卡的采集频率设为 1 kHz,即 1 ms 采集一次强度信息。由于采集速度较快,探测信号先缓存在数据采集卡中,全部采集完成后再一起发送给计算机。

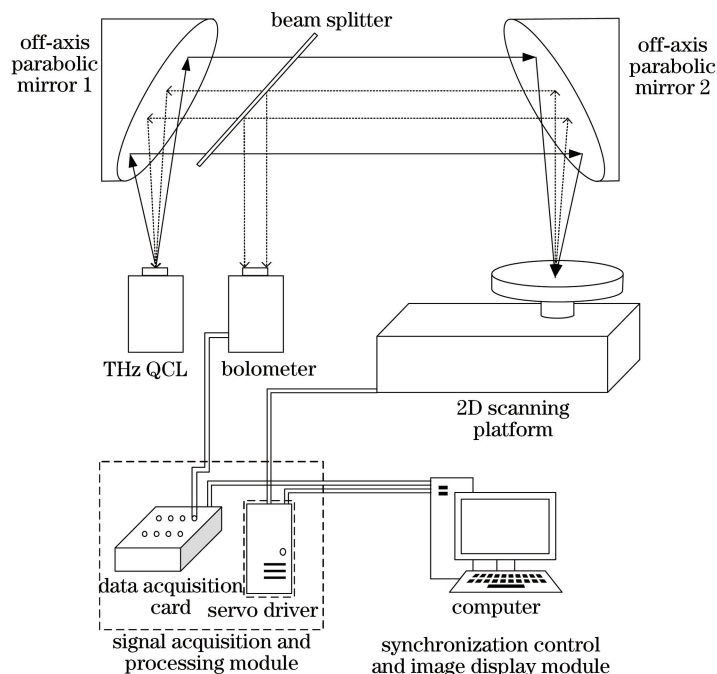


图 1 THz 快速成像实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of THz fast imaging

2.2 成像过程及成像原理

二维扫描平台的工作原理如图 2(a)所示,THz 波的会聚光斑位置始终保持不变,通过旋转台和平移台的运动使光斑可以扫描到载物台上待成像区域。扫描的起始点为旋转台中心,旋转台以 8 rad/s 的速度旋转,同时平移台以 8 mm/s 的速度匀速平移。为保证开始扫描时旋转台和平移台均达到匀速运动,在旋转台平移至距离起始点 20 mm 处开始扫描,此时 THz 会聚光斑恰好打在旋转台中心。每 1 ms 采集 1 次旋转台和平移台的位置信息,扫描时长为 5 s,共记录 5000 个点。伺服驱动器控制二维机械扫描平台的所有运动,并且记录它们的位置信息,位置信息首先缓存在伺服驱动器中,全部采集完后一起发送给计算机。最后,在

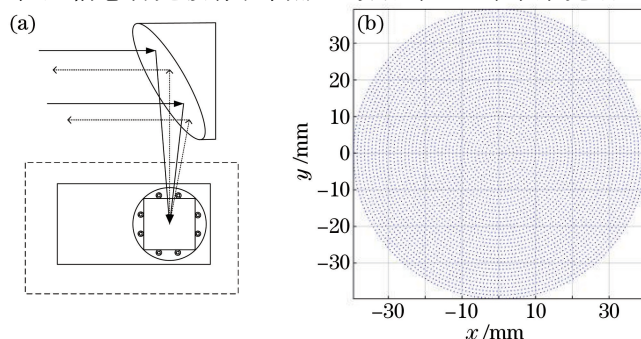


图 2 二维扫描平台工作原理图。(a)旋转台和平移台的俯视图;(b)旋转扫描区域的二维散点图

Fig. 2 Working principle schematic of 2D scanning platform. (a) Plan view of rotational platform and translational platform; (b) 2D scatter plot in the rotational scanning area

计算机上还原位置信息可得到如图 2(b)所示的二维螺旋线扫描散点图,成像范围是直径为 80 mm 的圆形区域。将探测器探测到的所有强度信息通过同步控制模块加在每个像素扫描点上,通过图像处理即可得到最终的成像结果。

计算机通过 Matlab 软件对采集到的数据进行处理。首先将采集到的 5000 个点的旋转角度信息记为 a , 平移位置信息记为 b , 探测强度信息记为 z 。根据阿基米德螺旋线的公式将采集数据由极坐标系的位置信息转换为平面直角坐标系的位置信息

$$x = b \times \cos a, \quad y = b \times \sin a. \quad (1)$$

由(1)式可得到采集点的二维位置坐标 (x, y) 。探测强度信息可记为形如 $z = f(x, y)$ 的离散函数。

使用 Matlab 中的 `griddata` 函数将采集到的离散点网格化。该函数可以将位于同一空间坐标系下的散点插值为规则网格;该函数包含 4 种插值方法(最近邻插值、线性插值、三次多项式插值和四格点样条插值),可以方便地实现结合邻近离散点分布特征的光滑曲面拟合^[9]。4 种插值方法的成像结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,最近邻插值和线性插值构成的曲面不光滑不连续,三次多项式插值和四格点样条插值构成的曲面较光滑。在计算时间方面,最近邻插值耗时 1.44 s,线性插值耗时 0.85 s,三次多项式插值耗时 0.61 s,四格点样条插值耗时 74.21 s。通过实验结果可知,最近邻插值和线性插值方法速度快,但拟合后的曲面不光滑,图像的边缘带有明显的螺旋线轨迹;四格点插值虽然可以获得较为平滑的重构图像,但由于在圆形区域外部也进行了大量的无用计算,在成像耗时方面远远超过其他 3 种计算方法。综合成像效果和成像时间等多种因素,在实验中选择三次多项式插值方法,成像结果的格点矩阵为

$$\mathbf{Z} = \text{griddata}(x, y, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \text{'cubic'}), \quad (2)$$

式中 \mathbf{X}, \mathbf{Y} 为通过 Matlab 中的 `Meshgrid` 函数生成的网格采样点矩阵。

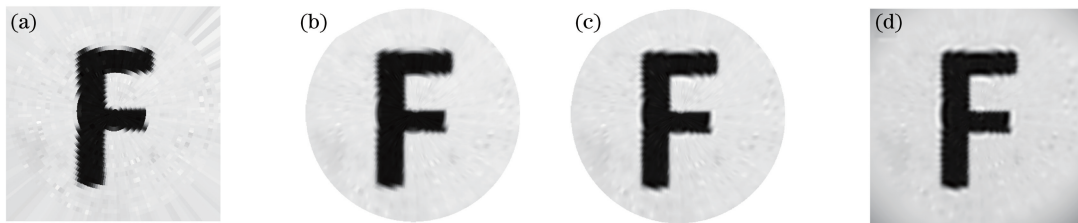


图 3 Griddata 函数的 4 种插值方法的成像结果。(a)最近邻插值;(b)线性插值;(c)三次多项式插值;(d)四格点样条插值

Fig. 3 Imaging results of four interpolation methods based on the griddata function. (a) Nearest neighbor interpolation;

(b) linear interpolation; (c) cubic polynomial interpolation; (d) four-lattice spline interpolation

此套成像系统除了可以提高扫描速度,减少成像时间外,在光路系统方面也有很大改进。与以往的反射透射成像光路不同,实验中只使用了一组离轴抛物面镜,有效地减少了光路元件数量;THz 激光器和 THz 探测器放在同一侧,未来将考虑把 THz 激光器与 THz 探测器封装在同一个热沉上,这样可以将激光器和探测器集成在一个杜瓦瓶中,进一步减少实验装置的使用成本和空间成本。

3 成像结果与分析

成像系统的空间分辨率主要取决于会聚焦点的大小。THz CCD 测得的聚焦光斑如图 4 所示。焦点的尺寸是利用日本 NEC 公司的 IRV-T0831C 型非制冷微测辐射热 THz CCD 相机测量的。该相机探测器镜头的材料为非晶硅,视场范围为 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$ 的阵列,像素尺寸为 $23.5 \mu\text{m}$,探测频率范围为 $1 \sim 7 \text{ THz}$ 。由图 4 可知,载物台表面上的聚焦光斑的直径大约为 0.4 mm。

扫描成像速度主要取决于扫描机械的移动速度。由于二维直线扫描的成像方式在每条线扫描结束时会产生非常大的速度变化,所以会影响扫描速度。单探测器成像是利用阿基米德螺旋线的扫描成像方式,在扫描过程中方向的改变不会降低扫描速度,因此可以大大地缩短扫描成像时间。实验中的焦点尺寸大约为直径 0.4 mm,成像范围的直径大约为 80 mm,共采集 5000 个像素点。

实验中首先对一个无遮挡的塑料牙签进行扫描成像,牙签长度约为 75 mm,牙线部分的宽度大约为 1.8 mm,如图 5(a)所示。图 5(b)是对应的 THz 成像结果,牙签中间部分的方块是用来固定牙签的透明胶

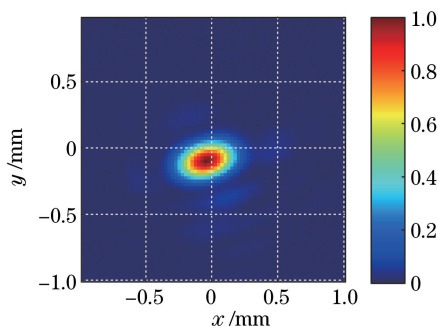


图 4 THz CCD 测得的聚焦光斑

Fig. 4 Beam profiles in the object plane measured by THz CCD

带。成像结果中的明暗相间的圆环是探测器的响应速率跟不上采集速率所造成的,需要通过后期的图像处理或者降低采样速率来解决,但这样会影响到成像扫描时间,在未来的改进中将会使用响应时间更快的探测器来做实验,比如 THz QWP,它的响应速率在纳秒量级^[16]。图 5(c)展示的是一个被遮挡的牙签,遮挡物是一黑色的聚乙烯塑料袋,在可见光频段已经完全看不见塑料袋下所藏匿的物体。图 5(d)是对应的 THz 成像结果,通过 THz 成像结果可以发现,黑色的聚乙烯塑料袋对 THz 波来说几乎是完全透明的,THz 波透过聚乙烯塑料袋的衰减非常小。

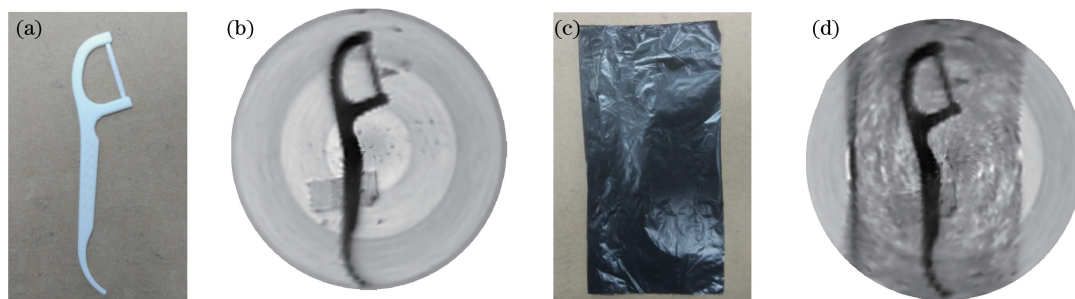


图 5 牙签的成像结果。(a)无遮挡物的牙签实物图;(b)无遮挡物的成像结果;
(c)藏匿在聚乙烯黑色塑料袋下的牙签实物图;(d)有遮挡物的成像结果

Fig. 5 Imaging results of a toothpick. (a) Physical picture of an uncovered toothpick; (b) uncovered imaging result; (c) physical picture of the toothpick covered with a black polyethylene plastic bag; (d) covered imaging result

为了分析图像质量,在图像信噪比较高的中心位置附近竖直放置牙线。如图 6(a)所示,选取图中带有牙线的虚线位置。图 6(b)为图 6(a)所对应虚线位置处的 THz 信号强度分布图,信号强度分别表示 THz 波通过平面镜、黑色聚乙烯塑料袋、牙签塑料部分和牙线部分的探测强度信息。由于聚乙烯塑料袋表面不是十分平整,材料也不均匀,造成探测信号波动比较大。THz 波扫描这 4 种表面时,探测的平均强度分别为 0.80, 0.60, 0.18, 0.20。强度值越高代表 THz 信号的反射率越高。通过图 6(b)也可以大致得到牙线的尺寸信息,

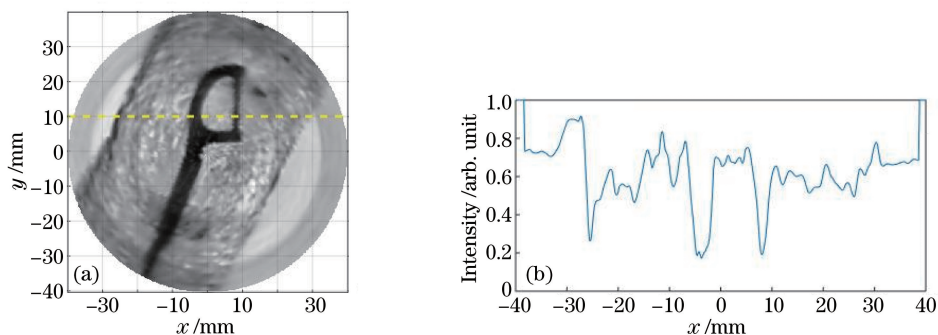


图 6 (a)牙签在靠近中心位置的成像结果;(b)虚线位置处的 THz 信号强度变化曲线

Fig. 6 (a) Toothpick imaging result near the center; (b) THz signal intensity curve at the dotted line

选取探测强度的半峰全宽位置作为实际物体的尺寸信息, 大约为 2 mm, 与实际的宽度非常接近。

图 7 为 THz QCL 和 THz QWP 对人民币进行扫描成像的结果, 扫描范围为 33 mm×52 mm 的人民币水印, 图像大小为 7035 pixel, 空间分辨率为 0.5 mm, 成像总时长大约 3 h^[9]。图 7 为二维直线扫描平台通过透射式逐点扫描获得的成像结果, 与图 6 比较可知, 两种扫描方式均采用了 THz QCL 作为发射源, 因此两种成像结果的空间分辨率都很高且比较相近。从成像结果可以看出, 文献[9]所得的结果比本文实验所得的结果更清晰, 主要原因在于一方面文献[9]所采用的是 THz QWP, 该探测器具有更好的分辨率和响应率, 另一方面文献[9]采用透射式成像方式, 并且光斑质量较高。但是, 该扫描方式消耗的时间远远超过旋转扫描方式消耗的时间。综上所述, 实验获得的成像结果虽然在还原效果上不如文献[9]的结果, 但是极大地缩短了成像时间。此外, 此套成像系统的成像分辨率可以通过使用其他探测器加以改善。

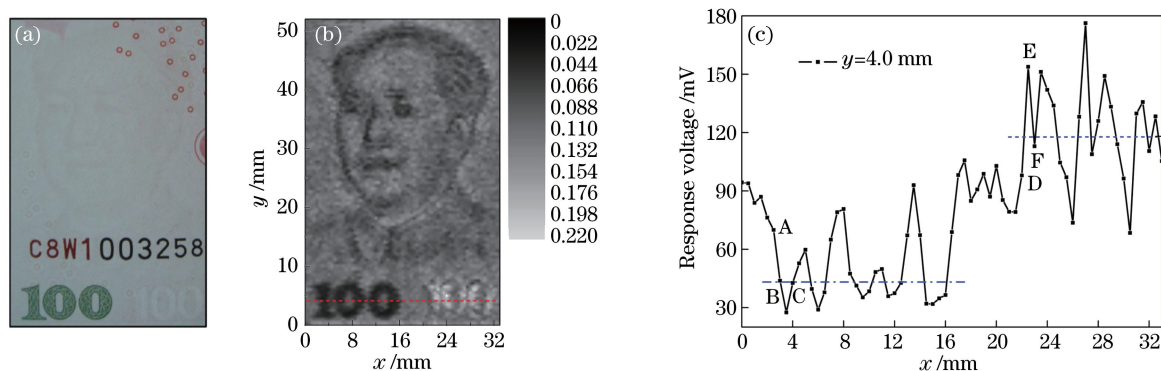


图 7 (a) 纸币水印实物图; (b) 纸币水印的 THz 成像结果; (c) $y=4$ mm 处的虚线处的 THz 信号强度变化曲线

Fig. 7 (a) Picture of the watermark region of a paper money; (b) THz image of the watermark region of the paper money; (c) THz intensity curve the dotted line of $y=4$ mm

4 结 论

利用太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 和旋转平移二维扫描机械装置搭建了反射式 THz 单点探测扫描成像系统。该系统在 5 s 的时间内可以获得空间分辨率为 0.4 mm 的反射图像, 实现了高质量、快速、连续的扫描成像。还对牙签进行了 THz 快速扫描成像实验的验证, 并通过黑色聚乙烯塑料袋作为遮挡物进行了成像对比分析。目前影响成像速度的因素已经不再是机械扫描速度, 而变成探测器的响应速度。在未来的工作中, THz QWP 可以取代热辐射探测器, THz QWP 探测响应速率可达到纳秒量级, 这将有利于进一步提高成像效果。此外, 下一步的计划是将激光器和探测器集成在同一个杜瓦瓶中, 通过这种方式可以减少实验装置的使用成本。该成像体制可以应用到安检等各种与成像相关的领域中。

参 考 文 献

- [1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [2] Zhao Guozhong. Application and outlook of THz spectroscopy and imaging[J]. Modern Scientific Instruments, 2006 (2): 36-40.
赵国忠. 太赫兹光谱和成像应用及展望[J]. 现代科学仪器, 2006(2): 36-40.
- [3] Li Haitao, Wang Xinke, Mu Kaijun, *et al.* Experimental studies on terahertz continuous wave related to security inspection[J]. Lasers and Infrared, 2007, 37(9): 876-878.
李海涛, 王新柯, 牧凯军, 等. 连续太赫兹波在安全检查中的实验研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(9): 876-878.
- [4] Kim S M, Hatami F, Harris J S, *et al.* Biomedical terahertz imaging with a quantum cascade laser[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(15): 153903.
- [5] Jin B B, Shan W L, Guo X G, *et al.* Terahertz detectors[J]. Physics, 2013.
- [6] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [7] Zhang L L, Karpowicz N, Zhang C L, *et al.* Real-time nondestructive imaging with THz waves[J]. Optics

- Communications, 2008, 281(6): 1473-1475.
- [8] Zhou T, Zhang R, Guo X G, *et al.* Terahertz imaging with quantum-well photodetectors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(13): 1109-1111.
- [9] Tan Z Y, Zhou T, Cao J C, *et al.* Terahertz imaging with quantum-cascade laser and quantum-well photodetector[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(14): 1344-1346.
- [10] Rothbart N, Richter H, Wienold M, *et al.* Fast 2-D and 3-D terahertz imaging with a quantum-cascade laser and a scanning mirror[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(5): 617-624.
- [11] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. Nature photonics, 2007, 1(9): 517-525.
- [12] Williams B S, Kumar S, Hu Q, *et al.* High-power terahertz quantum-cascade lasers[J]. Electronics letters, 2006, 42(2): 89-91.
- [13] Richards P L. Bolometers for infrared and millimeter waves[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(1): 1-24.
- [14] Wei J, Olaya D, Karasik B S, *et al.* Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics[J]. Nature Nanotechnology, 2008, 3(8): 496-500.
- [15] Vazhkudai S, Schopf J M. Predicting sporadic grid data transfers[C]. IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, 2002(5): 188-196.
- [16] Guo X G, Tan Z Y, Cao J C, *et al.* Many-body effects on terahertz quantum well detectors[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(20): 201101.