

太赫兹线阵快速扫描成像

王彪¹, 王新柯^{1*}, 俞跃², 张岩¹

¹首都师范大学物理系, 北京 100048;

²中国特种设备检测研究院, 北京 100029

摘要 采用 0.3 THz 辐射源和线阵探测器, 搭建了太赫兹线阵扫描成像系统。该成像系统完成 100 mm×100 mm 区域的测量仅需 1 min, 成像分辨率可达 1.5 mm, 可以准确识别聚乙烯样品和水管中预埋的缺陷, 高精度定位隐藏在信封内的剪刀和小刀。研究表明, 该成像技术可以快速检测隐蔽物, 在无损探伤和安全检查领域具有一定的实用价值。

关键词 太赫兹技术; 太赫兹成像; 透射; 快速扫描

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614029

Terahertz Linear Array Fast Scanning Imaging

Wang Biao¹, Wang Xinke^{1*}, Yu Yue², Zhang Yan¹

¹Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

²China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China

Abstract A THz linear array scanning imaging system was built using a 0.3 THz radiation source and a linear array detector. The imaging system only needs 1 min to achieve an imaging measurement over a 100 mm×100 mm region at an imaging resolution of 1.5 mm. Using this imaging system, the defects embedded in polyethylene samples and water pipes as well as the scissors and knives concealed in envelopes are quickly and accurately identified. The research results demonstrate that the proposed imaging system can rapidly inspect various objects and is suitable for non-destructive testing and security inspection.

Key words terahertz technology; terahertz imaging; transmission; fast scanning

OCIS codes 110.6795; 100.2980; 100.2000

1 引 言

太赫兹 (THz, 1 THz=10¹² Hz) 波是指频率为 0.1~10 THz 的电磁波, 它属于远红外电磁辐射, 是人类目前尚未完全开发的一个电磁波段。太赫兹辐射具有光子能量低、载波频率高等独特性质, 近年来, 太赫兹光谱与成像技术已成为光学领域的研究热点。太赫兹辐射对许多电介质材料和非极性物质 (塑料、陶瓷、纸张、衣物等) 具有良好的穿透性, 可用于此类材料的隐蔽物检测, 是 X 射线成像和超声波成像技术的有效补充, 在安检和无损检测领域具有广阔的应用前景^[1-5]。

太赫兹成像技术根据太赫兹波产生和探测的机

理, 可以分为脉冲太赫兹成像和连续波太赫兹成像。相对于脉冲太赫兹成像, 连续波太赫兹成像具有光学系统体积小, 成本低和成像速度快等优势, 并且只需要简单的实验器件即可完成搭建。2005 年, Karpowicz 等^[6] 搭建了用于安检的小型化太赫兹透射和反射成像系统, 太赫兹源为 0.2 THz 的耿氏振荡器, 探测器为肖特基二极管, 实现了对隐藏在公文包中刀具的检测; 2007 年, 周燕等^[7] 将耿氏二极管作为发射器, 肖特基二极管作为探测器, 搭建了连续太赫兹波成像系统, 对燃料箱绝缘泡沫板中的人工预埋缺陷进行无损探测; 2008 年, 袁宏阳等^[8] 利用返波振荡器太赫兹源和热释电探测器搭建了透射式连续太赫兹成像系统, 并对打孔铝板、公交卡以及隐藏在信封

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-01-31; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0209704)

* E-mail: wxk82721@cnu.edu.cn

内的硬币等物体进行成像。由于连续波太赫兹成像的优势,其更符合工业和民用领域的检测需求。然而,大多数连续波太赫兹成像系统采用逐点扫描方法进行数据采集,因此需要对样品进行逐点采样来构建太赫兹图像,这种测量方式需要消耗大量时间。

本文利用 0.3 THz 辐射源与线阵探测器,搭建了一套透射式太赫兹线阵扫描成像系统,实现了对物体的快速线扫描成像。该系统仅需要 1 min 检测时间,即可对 100 mm×100 mm 范围进行测量,同时成像分辨率达到 1.5 mm。利用该系统对聚乙烯样品中的缺陷与聚乙烯水管中的缺陷和异物,以及隐藏在信封内的剪刀和小刀进行扫描成像,可以快速准确地识别出待测目标的形貌与位置。对比实验进一步验证了该系统的性能优势,证明了该成像技术在无损探伤和安全检查领域的实用价值,推动了太赫兹实用化技术的进展。

2 实验装置

采用 0.3 THz 辐射源和线阵探测器(300 GHz

Terahertz source 和 300 GHz Linear camera, Terasense 公司,美国)搭建扫描成像系统,其中辐射源输出功率约为 14 mW,探测器的单个像素大小为 0.5 mm×0.5 mm,像素数目为 256 pixel×1 pixel,采集速度可达 100 frame/s。

太赫兹线阵扫描成像系统的示意图和照片如图 1 所示,辐射源产生频率为 0.3 THz 的电磁波,通过喇叭口天线将太赫兹波传输至自由空间,经过金属离轴凹面反射镜聚焦到探测器。采用凹面反射镜对太赫兹光束进行一维聚焦,因此在焦平面上形成一条焦线,用于样品扫描。成像系统使辐射源和探测器保持同步,在一维方向连续调整样品位置,使焦线扫描整个样品,最终构建样品的太赫兹图像。在测量过程中,样品尽量贴近探测器,以减少太赫兹波衍射对图像质量的影响。由于该成像系统不需要进行二维扫描,且太赫兹线阵探测器具有较快的响应速度,因此可以大幅缩短成像时间。

图 1(c)给出了凹面反射镜焦平面处测得的太赫兹焦线图像,可以看出,太赫兹波被聚焦成一条窄

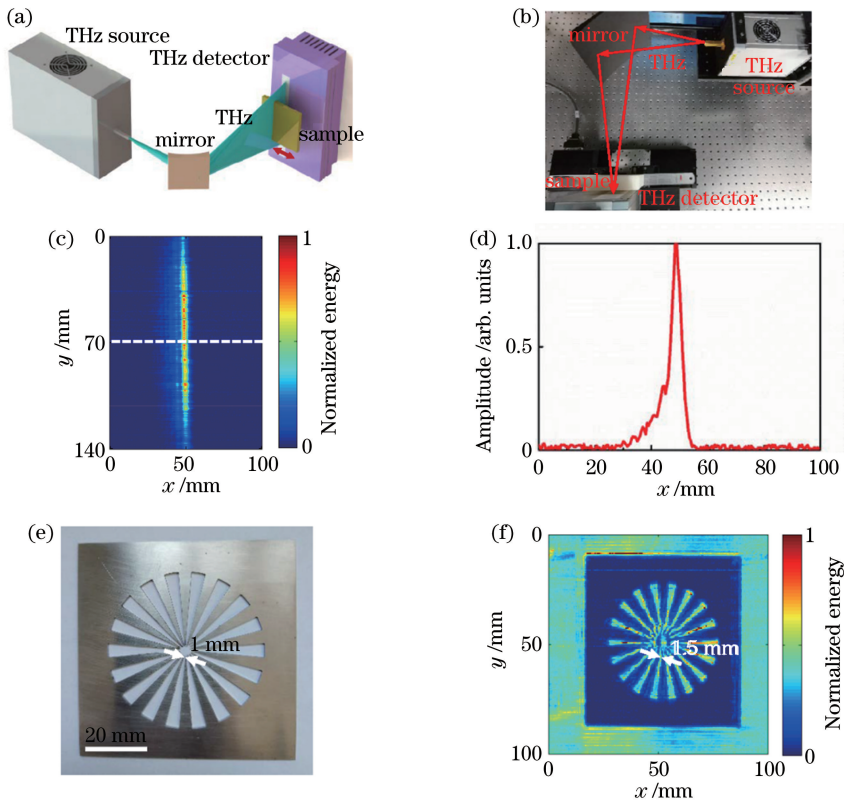


图 1 0.3 THz 线阵扫描成像系统及性能测试结果。(a)系统示意图;(b)系统照片;(c)太赫兹焦线图像;(d)从图 1(c)提取的强度曲线;(e)钢质分辨率板照片;(f)分辨率板的太赫兹图像

Fig. 1 0.3 THz linear array scanning imaging system and results of performance testing. (a) Schematic illustration of imaging system; (b) photo of imaging system; (c) image of THz focal line; (d) intensity curve extracted from Fig. 1(c) along dashed line; (e) photo of steel resolution test target; (f) THz image of resolution test target

线,达到了预期的效果。焦线不均匀分布是由于太赫兹光斑的不均匀和耦合光路的调节误差所导致。在图 1(c)中沿 x 轴方向提取一条强度曲线(虚线位置),如图 1(d)所示,可得焦线的半峰全宽约为 3.5 mm。另外,由于系统光路衍射的影响,在主焦线左侧存在一些微弱的衍射条纹。但这些旁瓣的强度很弱,不会对成像效果造成明显影响。为了测试系统的分辨率,对钢质分辨率板进行成像测试,分辨率板如图 1(e)所示,最细间隙为 1 mm。在图 1(f)给出的分辨率板的太赫兹图像中,可以清晰地看到分辨率板的形貌,可以对 1.5 mm 以上的间隙进行清晰分辨,因此系统的成像分辨率达到 1.5 mm。

3 实验结果与分析

3.1 无损探伤线扫描成像

利用所设计的成像系统,对标准聚乙烯样品内部的预埋缺陷进行测量。图 2(a)所示为划痕缺陷样品,厚度为 25 mm,在样品背面加工 4 条划痕,如虚线所框范围所示。相邻划痕间隔为 20 mm,划痕的长、宽分别为 40 mm 和 0.5 mm,划痕深度分别为

5、5、2、1 mm。将样品安装在线性电动平移台上进行扫描,整体成像区域为 100 mm \times 100 mm,平移台扫描步长为 1 mm,成像时间约为 1 min。图 2(b)所示为划痕缺陷样品的太赫兹图像,可以清楚地看到 4 条划痕缺陷的位置。物体内部的缺陷或损伤对太赫兹波的吸收不同,同时,由于其边缘对太赫兹波的散射效应,太赫兹光波的强度受到影响,因此太赫兹图像明暗不同,据此可观测出物体内部缺陷或损伤所在的位置及形貌。图 2(c)所示为从图 2(b)中沿 x 轴方向提取的强度曲线(虚线位置),可以看出样品存在 4 处缺陷。由于太赫兹图像受到衍射影响,在缺陷边缘存在一定的衍射条纹。根据强度曲线中凹陷的宽度,可评估出缺陷的范围为 3 mm,实际值与测量值之间的误差主要由衍射导致。另外,从强度曲线可以看出,虽然 4 处缺陷深度不同,但在太赫兹图像中表现出同样的强度损耗,说明对太赫兹强度的影响主要来自样品缺陷的散射;另外,虽然成像系统的分辨率为 1.5 mm,但是对宽度为 0.5 mm 的缺陷依然能进行识别。

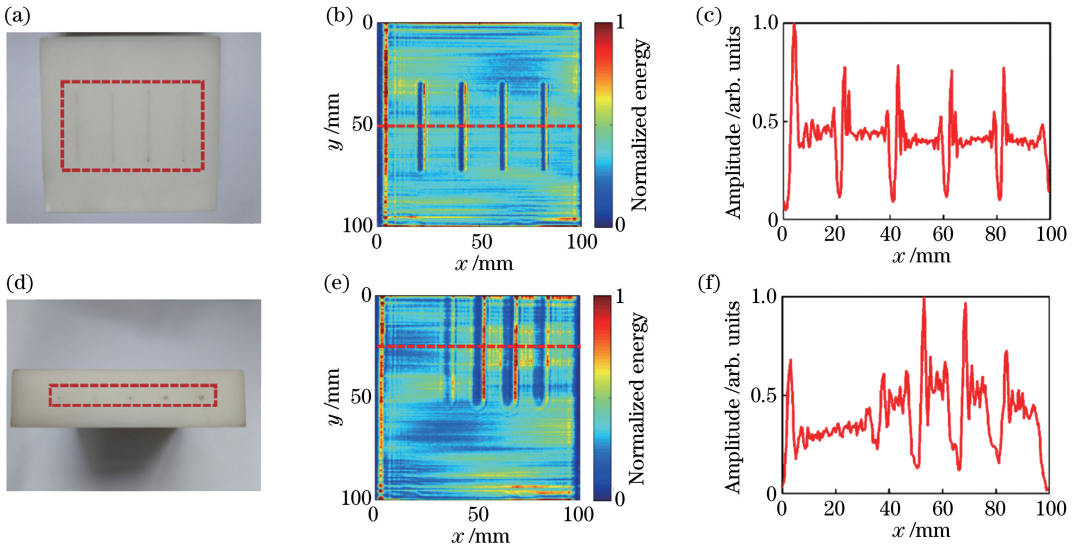


图 2 聚乙烯样品内部缺陷的太赫兹成像。(a)划痕缺陷样品;(b)划痕缺陷样品的太赫兹图像;(c)从图 2(b)沿虚线位置提取的强度曲线;(d)内部孔缺陷样品;(e)内部孔缺陷样品的太赫兹图像;(f)从图 2(e)沿虚线位置提取的强度曲线

Fig. 2 THz imaging of internal defects in polyethylene samples. (a) Sample with scratch defects; (b) THz image of sample with scratch defects; (c) intensity curve extracted from Fig. 2(b) along dashed line; (d) sample with internal hole defects; (e) THz image of sample with internal hole defects; (f) intensity curve extracted from Fig. 2(e) along dashed line

图 2(d)所示为内部孔缺陷样品,厚度为 25 mm,在样品内部加工 5 个圆形孔缺陷,如虚线所框范围所示。相邻缺陷间隔为 15 mm,5 个孔的直径从左到右分别为 0.2、0.5、1、1.5、2 mm,直径为

0.2 mm 的孔缺陷深度为 15 mm,其余深度均为 50 mm。图 2(e)给出了内部孔缺陷样品的太赫兹图像,成像区域仍为 100 mm \times 100 mm,在太赫兹图像中可以清晰看到直径为 0.5、1、1.5、2 mm 的 4

个孔像,像中孔的深度与实际一致,均为 50 mm。图 2(f)所示为从图 2(e)中沿 x 轴方向提取的强度曲线(虚线位置),直径为 0.5 mm 的孔缺陷引起的太赫兹强度损耗明显小于其他 3 个孔缺陷。另外,比较曲线的 4 个凹陷可以发现,4 个凹陷范围逐渐增大,表明 4 处缺陷宽度逐渐递增,可以评估出 4 个凹陷的宽度为 5.5、6、6.5、8 mm。由于样品内部孔缺陷与探测器之间的距离较大,因此受到衍射的影响更加明显,进而导致测量结果与实际缺陷尺寸之间存在偏差。另外,成像系统没有测量到直径为 0.2 mm 的孔缺陷,可能是因为系统分辨率为 1.5 mm,而缺陷尺寸远小于系统分辨极限,因此无法辨识。

为了测试扫描成像系统的实际应用,对有缺陷的聚乙烯水管进行成像检测,模拟太赫兹成像系统

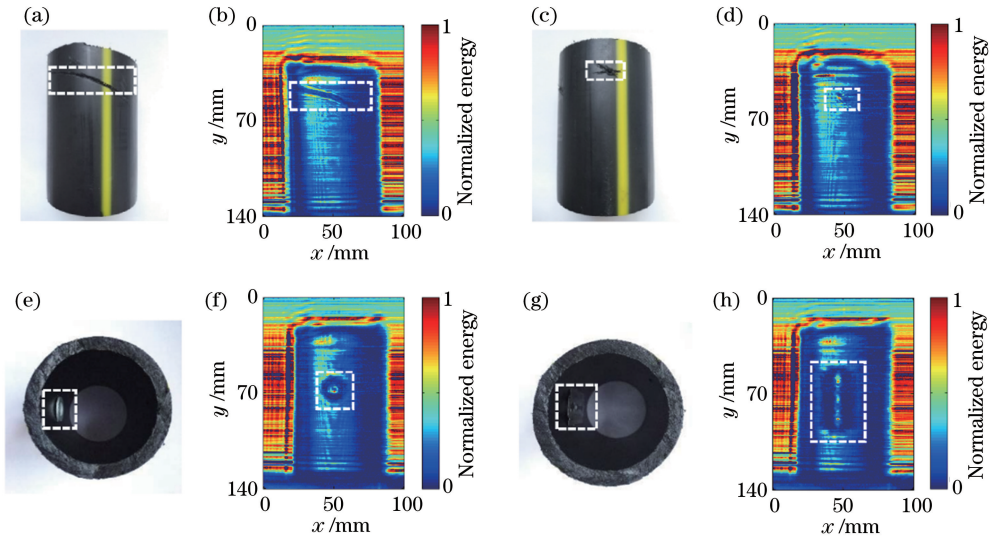


图 3 聚乙烯水管缺陷的太赫兹成像。(a)、(c)水管表面的两个不同缺陷照片;(b)、(d)两个缺陷的太赫兹图像;(e)、(g)隐藏在水管内部的金属垫圈和金属刀片的照片;(f)、(h)隐藏在水管内部的垫圈和刀片的太赫兹图像

Fig. 3 THz imaging of defects on polyethylene water pipe. (a), (c) Photos of two different defects on surface of polyethylene water pipe; (b), (d) THz images of two defects; (e), (g) photos of metallic washer and blade hidden in water pipe; (f), (h) THz images of washer and blade hidden in water pipe

3.2 隐藏物线扫描成像

利用太赫兹成像技术进行安全检查已经成为太赫兹实用化研究的一个主要发展方向。为了测试成像系统对隐藏危险物品的检测能力,对装在信封里的剪刀和小刀进行扫描成像。图 4(a)、(c)所示为隐藏在信封内的剪刀和小刀;图 4(b)、(d)所示为装在信封内的剪刀和小刀的成像结果,成像范围是 100 mm×100 mm,成像时间为 1 min。可以看出,由于存在遮挡,图像背景出现若干衍射和干涉条纹,但是依然可以清楚地观察到隐藏在信封内的剪刀和小刀轮廓。表明该成像系统可以透过隐藏物对金属样品进行鉴别,证明成像系统具有较强的检测能力。

对管道的检测过程。图 3(a)、(c)给出了水管表面加工的两个不同缺陷,如虚线框所示,水管壁厚厚度为 6.3 mm;图 3(b)、(d)给出了两个缺陷的太赫兹成像,成像区域均为 140 mm×100 mm。成像结果中清晰地显示出长、短两个缺陷的位置及形貌,表明此成像系统对水管表面的缺陷具有较好的检测能力。此外,实验还对水管内部隐藏的异物进行了检测。图 3(e)、(g)分别给出了将金属垫圈和金属刀片固定在水管内壁的照片,水管内部异物的位置如虚线所框所示;图 3(f)、(h)给出了两个异物的太赫兹成像结果,可以清晰地看出垫圈和刀片的位置及轮廓。检测结果表明,该系统对聚合物材料的内部缺陷和异物都具有较好的检测能力,在无损检测领域具有一定的实用性。

3.3 成像系统性能比较

为了进一步说明太赫兹成像系统的检测优势,表 1 给出了部分已发表文献所报道的太赫兹连续波成像系统与本文成像系统之间的性能差异,包括成像时间、成像面积和分辨率。从表 1 可以看出,一般太赫兹成像系统要达到较高的分辨率,都需要较长的测量时间,同时成像面积不会很大;如果要获得较大的成像面积,又要保持较短的测量时间,必须降低成像分辨率。综合比较可知,本文成像系统具有最大的成像面积和最短的成像时间,同时可以实现足够的成像分辨率。因此,该成像系统在无损探伤和安全检查领域具有更好的检测能力。

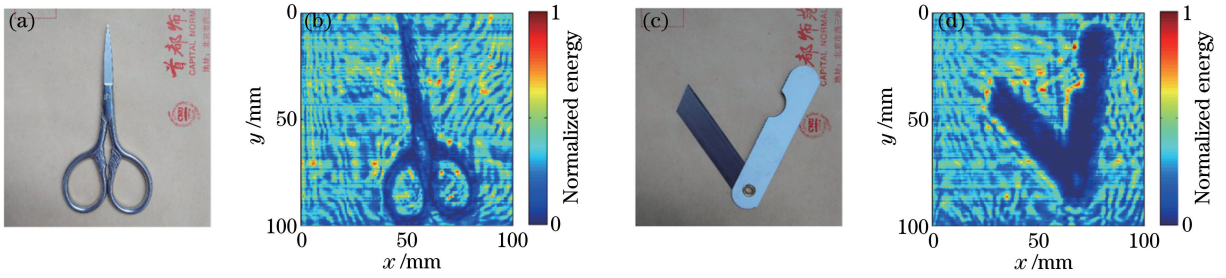


图 4 隐藏在信封中剪刀和小刀的太赫兹成像。(a)、(c)隐藏在信封中的剪刀和小刀；
(b)、(d)隐藏在信封中剪刀和小刀的太赫兹图像

Fig. 4 THz imaging of scissor and knife hidden in envelopes. (a), (c) Photos of scissor and knife hidden in envelopes; (b), (d) THz images of scissor and knife hidden in envelopes

表 1 不同太赫兹成像系统的性能比较

Table 1 Performance comparison of various THz imaging systems

System	Imaging time /min	Imaging range /(mm×mm)	Resolution /mm
System in Ref.[9]	58	95×65	1.587
System in Ref.[10]	15	24×27	0.393
System in Ref.[11]	25	30×20	0.1
System in Ref.[12]	3	54×54	4
Proposed system	1	100×100	1.5

4 结 论

利用 0.3 THz 辐射源和线阵探测器搭建了太赫兹线扫描成像系统,实现了对于聚乙烯物体和水管内部缺陷的检测,完成了对装在信封中剪刀和小刀的成像。实验结果表明,该成像装置能对不同形貌的缺陷进行识别,可以检测实际物体,在无损伤和安全检查领域都具有一定的实用性;在 100 mm×100 mm 的成像范围内,系统成像时间仅需 1 min,实际分辨率可达 1.5 mm。相比于传统逐点扫描成像技术,该成像系统在实际应用中具有明显优势。在未来的工作中,考虑将系统改进为反射测量模式,并利用图像处理算法减弱衍射效应对图像质量的影响,进一步提升系统的检测精度。

参 考 文 献

[1] Shen Y C, Lo T, Taday P F, *et al.* Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(24): 241116.
 [2] Jackson J B, Mourou M, Whitaker J F, *et al.* Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(4): 527-532.
 [3] Adam A J L, Planken P C M, Meloni S, *et al.* Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas [J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3407-3416.

[4] Zhong H, Redo-Sanchez A, Zhang X C. Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focal-plane imaging system [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9130-9141.
 [5] Lee A W, Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2563-2565.
 [6] Karpowicz N, Zhong H, Zhang C L, *et al.* Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(5): 054105.
 [7] Zhou Y, Mu K J, Zhang Y D, *et al.* Nondestructive testing of fuel tank foam with continuous wave terahertz[J]. *Nondestructive Testing*, 2007, 29(5): 266-267, 271.
 周燕, 牧凯军, 张艳东, 等. 燃料箱泡沫板的连续太赫兹波无损检测[J]. *无损检测*, 2007, 29(5): 266-267, 271.
 [8] Yuan H Y, Ge X H, Jiao Y Y, *et al.* Nondestructive testing by continuous terahertz imaging system based on backward wave oscillator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(6): 912-916.
 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): 912-916.
 [9] Ok G, Kim H J, Chun H S, *et al.* Foreign-body detection in dry food using continuous sub-terahertz wave imaging[J]. *Food Control*, 2014, 42: 284-289.

- [10] Li Q, Yao R, Ding S H, *et al.* Experiment on 2.52 THz transmission-mode imaging for concealed objects[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0711001.
李琦, 姚睿, 丁胜晖, 等. 遮挡物的 2.52 THz 透射成像实验研究 [J]. 中国激光, 2011, 38 (7): 0711001.
- [11] Li Z X, Xu D G, Wang Y Y, *et al.* Experimental investigation on the fast imaging of terahertz continuous wave transmission-mode point scanning [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26 (1): 177-183.
李忠孝, 徐德刚, 王与焯, 等. THz 波连续波透射式逐点扫描快速成像实验研究 [J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(1): 177-183.
- [12] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, *et al.* Research on the terahertz active ghost imaging technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0814001.
闫昱琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0814001.