

# 隐藏物的连续太赫兹反射扫描成像实验

李 琦 丁胜晖 姚 睿 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。其中太赫兹反射成像具有更为广泛的应用空间。由于对常见包装品和衣物的穿透能力在太赫兹反射成像系统的评估中十分重要, 故利用 CO<sub>2</sub> 抽运太赫兹激光器所搭建的 2.52 THz 反射扫描成像系统对剃须刀、铅笔字、5 角硬币、金属纪念币和星卡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, 该成像装置可以穿透单层实验服或单层纸制信封对目标成反射像, 最大插入损耗近 42 dB。

**关键词** 成像系统; 太赫兹成像; 遮挡物; 穿透能力; 反射

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0811001

## Experiments on Continuous-Wave Terahertz Reflection-Mode Imaging for Concealed Objects

Li Qi Ding Shenghui Yao Rui Wang Qi

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

**Abstract** Terahertz (THz) imaging has the advantages that THz radiation can penetrate most nonmetal and nonpolar materials for concealed objects detection, while it is harmless to the organisms. THz reflection-mode imaging has a more widely application range. Thus the penetrating ability for common packaging materials and clothes becomes very important to evaluate a THz reflection-mode imaging system. Therefore, penetration experiments are carried out by using a 2.52 THz reflection-mode scanning system. The system is constructed based on a CO<sub>2</sub> pumped THz laser. The imaging targets are a razor blade, a penciled character, a 50 cents coin, a metal commemorative coin, and Siemens star. Papers, paper envelopes, and lab gowns are used as the shelters, and the imaging results are compared and analyzed. The experiment results demonstrate that the system can image through one layer of the lab gown or a paper envelope. The maximum insertion loss approaches 42 dB.

**Key words** imaging systems; Terahertz imaging; shelter; penetration ability; reflection

**OCIS codes** 110.6795; 110.3000; 110.2960

## 1 引 言

太赫兹 (THz) 成像是当今成像技术的前沿课题之一, 备受关注, 其中大多数是关于太赫兹透射成像的研究<sup>[1~3]</sup>。在许多实际应用中, 无法进行透射成像, 只能借助于反射成像获得相关信息。因此, 太赫兹反射成像具有较为广泛的应用空间<sup>[4~6]</sup>, 对太赫兹反射成像的研究十分必要。Salhi 等<sup>[3]</sup>提出基于 CO<sub>2</sub> 抽运太赫兹激光器的反射式光学共焦显微镜方案。Dickinson 等<sup>[7]</sup>提出了利用基于两支 CO<sub>2</sub> 抽

运气体激光器的反射式点扫描外差成像系统, 实现了真人棉衬衫里藏匿手枪的成像。荷兰研究人员利用飞秒激光器对已用颜料覆盖的油画进行了成像实验。国内首都师范大学等单位也搭建了多种反射成像系统。目前研究的太赫兹反射成像多采用飞秒激光器、自由电子激光器和 CO<sub>2</sub> 抽运气体激光器作为光源。CO<sub>2</sub> 抽运气体激光器体积小、易于操作, 是目前应用性较强的太赫兹辐射源。文献<sup>[8,9]</sup>分别报道了利用两种自制的分辨率板测量同一 2.52 THz 反射

收稿日期: 2012-03-28; 收到修改稿日期: 2012-05-04

作者简介: 李 琦 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光雷达和太赫兹成像等方面的研究。E-mail: hit\_liqi@yahoo.cn

扫描成像系统分辨率的实验结果。此系统采用相干公司 CO<sub>2</sub> 抽运连续太赫兹激光器 SIFIR-50 作为成像光源,分辨率达到 0.393 mm。文献[8]还给出了数字图像复原结果。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,太赫兹成像系统对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。在太赫兹成像系统中,穿透能力是一个重要性能参数以及研究热点<sup>[10]</sup>。国内开展 CO<sub>2</sub> 抽运太赫兹激光器反射扫描成像穿透能力实验研究很少,且穿透衣物的实验尚未见报道。

本文利用一台 CO<sub>2</sub> 抽运太赫兹激光器所搭建的 2.52 THz 反射扫描成像系统对剃须刀、铅笔字和硬币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,并进行比较分析。

## 2 成像装置

太赫兹反射扫描成像系统的激光工作频率为 2.52 THz,输出功率约 50 mW,图 1 给出此成像系统原理图,装置详细介绍参见文献[8,9]。He-Ne 激光作为指示光源。图中 P 代表离轴抛物面镜,M 代表平面反射镜。太赫兹激光透过硅片经 P1 将光束聚焦,斩波器放在此焦点处,穿过斩波器的太赫兹激光经过 P2、P3 和 M1 聚焦到物面上,M1、M2 和成像焦斑构成一个边长为 7 cm 的等边三角形,成像光束入射角为 30°,反射光经过 M2、P4 和 P5 聚焦到单元探测器。此单元探测器是美国 Molectron 公司生产的 P4-42 型室温 LiTaO<sub>3</sub> 热释电探测器,其探测率为  $2.7 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ ,等效噪声功率为  $0.65 \times 10^{-9} \text{ W} / \text{Hz}^{1/2}$ 。由于是倾斜照射目标,因此

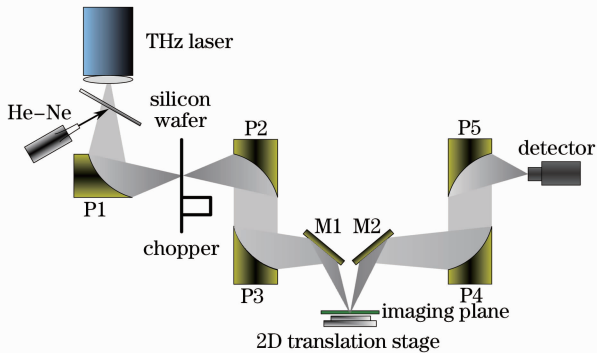


图 1 反射扫描成像原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of reflection-mode scanning imaging system

扫描光斑水平和垂直方向宽度不同,采用刀口法的测量结果分别为 0.89 mm 和 0.74 mm。

此成像系统的优势在于全部由反射镜组成,一方面减小了半反半透元件造成的透射损耗,从而提高了能量利用率,另一方面可以全程使用氦氛光源进行光路的辅助调节。另外,只需将反射镜 M1 和 M2 移出,将目标放置在焦平面位置,并将 P4、P5 和探测器向左侧整体平移 7 cm 即可实现扫描透射成像,便于实现多体制扫描成像。此系统空间分辨率约为  $0.4 \text{ mm}^{[9]}$ 。

## 3 隐藏物成像的实验结果

实验中,相对湿度约为 35%,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,在垂直入射光方向单层 A4 纸插入损耗约为 3.7 dB;在 30°入射情况下,即在目标前经两次斜透射,双层 A4 纸、单层特快专题信封和单层实验服的插入损耗分别约为 15、32 dB 和 38 dB。显然斜入射时的纸张的插入损耗基本与垂直入射时相同,但与文献[10]中垂直入射的双层特快专题信封和双层实验服插入损耗 25 dB 和 20 dB 不同,且明显增大,实验服插入损耗增大程度更为严重。其原因可能是实验服和特快专题信封纹理较乱,且有一定厚度,散射明显,因此损耗增大。

为了检验成像系统对隐藏物的探测能力,激光器后放置 1 张纸,分别将 4 张纸、1 层纸质快递信封和 1 层实验服放置在剃须刀前进行隐藏物成像,如图 2 所示。数据采集的间隔时间为 400 ms,步长为 0.5 mm。在目标前穿透 4 张纸后,探测器输出电压在 0.04 V 以下,透过 1 层快递信封后探测器输出电压在 0.03 V 以下,已经较低,因此图像中有许多噪点,但是还没有影响到图像的整体效果,仍然可以看清刀片的各个细节。而透过 1 层实验服后,探测器输出电压低至 0.007 V 左右,已经处于系统背景噪声(0.002~0.005 V)范围内,插入损耗约为 42 dB,此时已经很难分辨出刀片细节,只能看清大致轮廓。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。

接着,对写在 A4 纸上的铅笔字“龙”进行成像,如图 3 所示。由于铅笔字中含有石墨,因此可以反射太赫兹辐射,以此来检验系统对于含有石墨成分目标的反射成像能力。扫描步长为 0.2 mm,采集时间间隔为 500 ms,图像大小为 32 pixel×32 pixel。图 3(a)~(c)分别为激光器后放置 1 张纸时,目标



图2 刀片透过目标前不同遮挡物的成像结果。(a) 4张纸;(b)信封;(c)实验服

Fig. 2 Imaging results of a razor blade through different shelters before object. (a) 4 pieces of paper; (b) envelope; (c) lab-gown

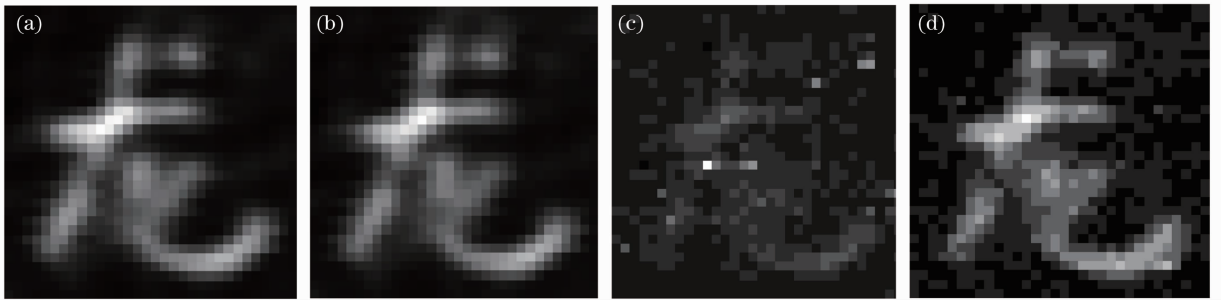


图3 铅笔字透过目标前不同遮挡物的成像结果。(a) 1张纸;(b) 2张纸;(c) 信封;(d) 仅有信封

Fig. 3 Imaging results of a pencil character through different shelters before object. (a) 1 piece of paper; (b) 2 piece of paper; (c) envelop; (d) only envelop

前分别放置1张纸、2张纸和1层快递信封的成像结果,插入损耗约为36 dB。最后图3(d)给出只在目标前放置1层快递信封的成像结果,此时插入损耗为32 dB。显然,在插入损耗不高于32 dB时,“龙”的点和撇与邻近的笔画有所粘连,无法完全分开,但是遮挡物的存在并未影响到对“龙”字的辨识。但插入损耗约为36 dB时,字迹模糊不清了。

以自制的星形分辨率测试卡(星卡)为目标,以纸为遮挡物进行穿透力实验。星卡内部有36个镂空的扇形,如图4(a)所示。材料为表面抛光的不锈钢,可近似认为反射率为1,而镂空部分反射率则为0。实验中扫描步长为0.2 mm,延迟500 ms。图4(b)给出激光器后1张纸、目标前2张纸、探测

器前1张纸的反射成像结果,图像大小为70 pixel×70 pixel。图5给出两个图像大小皆为60 pixel×60 pixel的穿透纸张的成像结果,在激光器后1张纸、探测器前1张纸的相同条件下,不同的是目标前分别是3张纸和4张纸。由于插入损耗已达37 dB,且星卡较刀片的反射率低,图5(b)有电噪声,导致图像偏暗,为此又给出经过对数变换的图像[图5(c)],扩展了暗像素,提高了图像对比度。图6给出激光器后1张纸、目标前5张纸的星卡成像结果,图像大小为60 pixel×60 pixel。此时插入损耗接近41 dB,图像中电噪声相当明显,导致图像严重模糊。

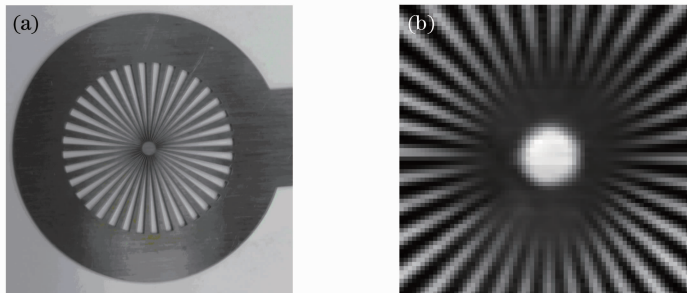


图4 星卡目标前2张纸的成像结果。(a)照片;(b)成像结果

Fig. 4 Imaging results of Siemens star through 2 pieces of paper before object. (a) Photo; (b) imaging results

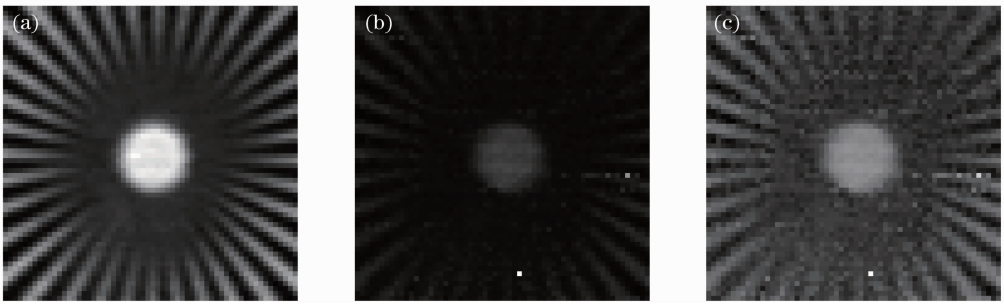


图 5 星卡目标前 3 张和 4 张纸的成像结果。(a) 3 张纸;(b) 4 张纸;(c) 4 张纸成像后取对数的结果

Fig. 5 Imaging results of Siemens star through 3 and 4 of pieces paper before object. (a) 3 pieces of paper; (b) imaging through 4 pieces of paper; (c) logarithmic transformation result for imaging through 4 pieces of paper

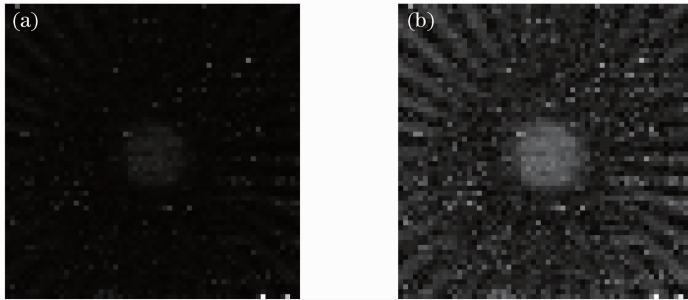


图 6 星卡目标前 5 张纸的(a)成像及(b)取对数结果

Fig. 6 (a) Imaging and (b) logarithmic transformation results of Siemens star through 5 pieces of paper

另外,还利用纸做遮挡物对硬币和纪念币进行了反射成像。透过激光器后 1 张纸和目标前 2 张纸对 5 角硬币进行成像,硬币表面有凸起的汉字、数字和英文字母,其凸起的高度很小,游标卡尺无法准确测出。依靠凸起处边缘对光的反射性质不同进行成像,以此来检验系统对于金属表面细小刻痕、凸起以及图案的成像能力。对 5 角硬币正面进行成像,直径为 20 mm,扫描步长为 0.2 mm,图像大小为 100 pixel×104 pixel,成像结果如图 7 所示。数字

“2009”笔画宽度为 0.5 mm,可以较清晰地进行分辨;“角”的笔画宽度为 0.6 mm,但内部网格间距在 0.3 mm 左右,无法分辨,只能根据边沿处散射光低灰度级看出大概轮廓;“5”的内部有间隔 0.2 mm 左右的条纹,图像中无法显示。对 5 角硬币背面进行成像,由于背面花纹的细节并不复杂,因此提高步长为 0.5 mm,图像大小为 41 pixel×50 pixel,如图 8 所示,能够较清晰地反映出目标的轮廓。

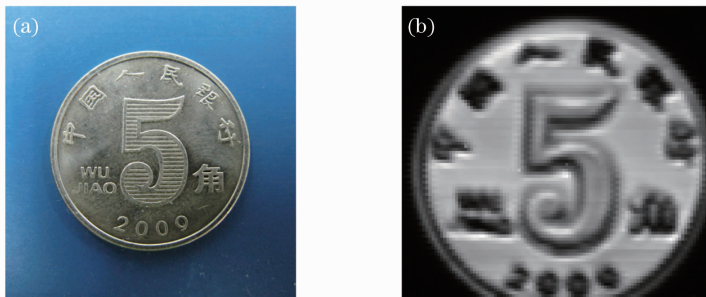


图 7 5 角硬币正面成像结果。(a)照片;(b)成像结果

Fig. 7 Imaging results of the obverse side of a 50 cents coin. (a) Photo; (b) imaging results

奥运福娃金属纪念币正面的反射成像结果如图 9 所示。激光器后和探测器前分别放置 1 张和 2 张纸时正面的成像结果,图像大小为 112 pixel×142 pixel,扫描步长为 0.2 mm。图 10 给出激光后和探测器前分别放置 2 张纸时反面的成像结果,图像大

小为 116 pixel×140 pixel,扫描步长为 0.2 mm。显然纪念币图像的基本轮廓清晰,但除“元”字外汉字无法识别。与图 7 和图 8 相比,图 9 和图 10 的整体均匀性略差,这是由于图像大小增大,延长了激光器工作时间,导致入射光功率不够稳定。

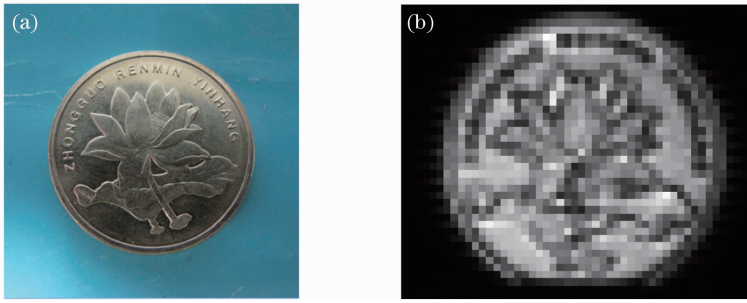


图 8 5角硬币背面成像结果。(a)照片;(b)成像结果

Fig. 8 Imaging results of the reverse side of a 50 cents coin. (a) Photo; (b) imaging results

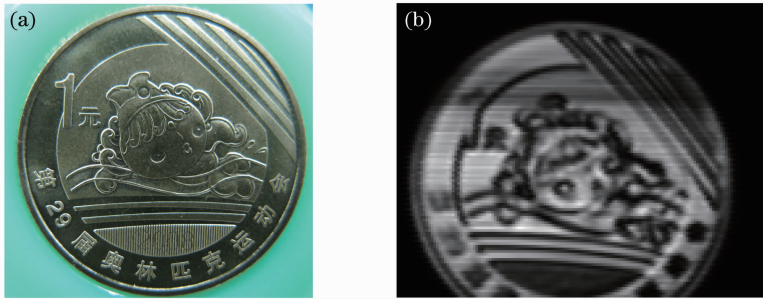


图 9 金属纪念币正面的成像结果。(a)照片;(b)成像结果

Fig. 9 Imaging results of the obverse side of a metal commemorative coin. (a) Photo; (b) imaging results

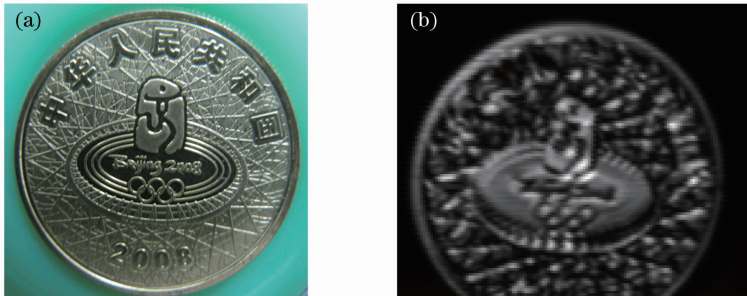


图 10 金属纪念币反面的成像结果。(a)照片;(b)成像结果

Fig. 10 Imaging results of the reverse side of a metal commemorative coin. (a) Photo; (b) imaging results

采用了太赫兹成像实验中广为研究的目标(如剃须刀、铅笔字和硬币)和作为分辨率标准目标的星卡,遮挡物也采用了标准的打印纸和市面上使用的纸制特快专递信封和实验服,因此实验结果具有较好的普适性。对于太赫兹扫描成像而言,数据采集间隔长且扫描步长小可以提高成像质量,有较高的空间分辨率。本系统的分辨率在0.1 mm扫描步长时可以达到0.393 mm<sup>[9]</sup>,但是此时只适用于小目标细节处的高分辨率成像,对于较大目标则会大幅提高成像时间,导致成像速度的降低。因此,实验中对于细节大于0.4 mm的目标,采用0.2 mm步长即可看到基本轮廓,又不会导致成像时间过长及激光不稳定对成像带来的条纹波动。由于表面光滑高的金属反射率远高于石墨,因此铅笔字遮挡物插入损耗只有32 dB,比剃须刀片遮挡的插入损耗小

10 dB。细节多的(即高频成分多)目标较细节少的目标(即低频成分多)反射率低,因此,星卡遮挡物插入损耗低于剃须刀片遮挡物的。另外,由于光束斜入射到目标表面,如果目标表面的凸起较高,会完全遮挡住反射光线,因此本成像系统无法对纵深较复杂的目标进行准确成像。本反射成像系统更适用于表面变化较小的目标。

## 4 结 论

通过利用CO<sub>2</sub>抽运太赫兹激光器所搭建的2.52 THz反射扫描成像系统对剃须刀、铅笔字和硬币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单层实验服或单层特快专递信封对以上目标成反射像,最大插入损耗

近 42 dB。与文献[10]透射成像最大插入损耗 50 dB相比小 8 dB。可以预期,随着激光器功率、探测器灵敏度和响应时间的提高,此类成像体制有望应用到安检等领域。本实验也为进一步利用图像处理方法提高反射图像质量的研究提供了原始数据<sup>[11]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulse terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Laser*, 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
- 2 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
- 3 M. A. Salhi, I. Pupeza, Martin Koch. Confocal THz laser microscope[J]. *J. Infrared Milli. Terahertz Waves*, 2010, **31**(3): 358~366
- 4 Deng Chao, Xing Chunfei, Lü Mo *et al.*. CW THz standoff imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 50~52  
邓 朝, 邢春飞, 吕 默等. 连续太赫兹波远距离成像[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 50~52
- 5 Z. D. Taylor, R. S. Singh, M. O. Culjat *et al.*. Reflective terahertz imaging of porcine skin burns[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1258~1260
- 6 Qi Li, Rui Yao, Qiguo Yin *et al.*. 2.52-THz scanning reflection imaging and image preprocessing[C]. *SPIE*, 2009, **7277**: 72770J
- 7 J. C. Dickinson, T. M. Goyette, A. J. Gatesman *et al.*. Terahertz imaging of subjects with concealed weapons[C]. *SPIE*, 2006, **6212**: 62120Q
- 8 S. H. Ding, Q. Li, R. Yao *et al.*. High-resolution terahertz reflective imaging and image restoration[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(36): 6834~6839
- 9 Ding Shenghui, Li Qi, Li Yunda *et al.*. Experimental research on resolution measurement of a continuous-wave terahertz reflection-mode scanning system[J]. *Chinese J. Laser*, **38**(10): 1011001  
丁胜晖, 李 琦, 李运达等. 连续太赫兹反射扫描成像分辨率测量实验研究[J]. *中国激光*, **38**(10): 1011001
- 10 Li Qi, Yao Rui, Ding Shenghui *et al.*. Experiment on 2.52 THz transmission-mode imaging for concealed objects[J]. *Chinese J. 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 Qi, Xia Zhiwei, Ding Shenghui *et al.*. Image denoising of CW THz images by use of non-local mean[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2): 517~524  
李 琦, 夏志伟, 丁胜晖等. 采用非局部均值的连续太赫兹图像去噪处理[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(2): 517~524

栏目编辑:李文喆