

2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析

姚 睿 丁胜晖 李 琦 王 骐

(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(THz)面阵成像具有成像速度快和像素多等特点,因此具有广阔的应用前景。成像系统的光路设计对成像质量具有很大影响。利用 Pyrocam III 热像仪作为面阵探测器,利用相干公司 SIFIR-50 连续太赫兹激光器作为成像光源,搭建太赫兹面阵实时成像系统,并通过多个离轴抛物镜和聚乙烯透镜对原有成像系统进行改进,以人民币水印、镂空金属板和分辨率板为目标进行实时面阵成像,获得了较为清晰的图像,通过与原有成像结果对比,验证了成像质量的提高,并通过分析成像结果对该成像系统的分辨率进行估计,该成像系统分辨率可以达到 0.6 mm。

关键词 成像系统;太赫兹成像;面阵成像;实时成像;分辨率

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0111001

Improvement of 2.52 THz Array Transmission Imaging System and Resolution Analysis

Yao Rui Ding Shenghui Li Qi Wang Qi

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

Abstract THz Array imaging has wide application foreground because of the high imaging speed and large detection area. The design of optical path has great effect on image quality. The THz real imaging system is constructed by use of the SIFIR-50 THz laser as imaging illuminant and Pyrocam III thermal imager as array detector. The system has been improved using a series of off-axis parabolic reflectors and polyethylene lens. Imaging experiments on the object of water mark, hollowed-out metal board and resolution board have been made and clear images are obtained. By comparing with original imaging results, it is validated that the imaging quality is well improved. By analyzing the imaging results, resolution of the imaging system can be evaluated and reaches up to 0.6 mm.

Key words imaging systems; THz imaging; array imaging; real imaging; resolution

OCIS codes 110.6795; 110.0110

1 引 言

近年来对太赫兹(THz)成像的研究报道较多^[1~6]。相比于利用单元探测器的点扫描成像,利用面阵探测器的面阵成像具有单幅图像像素点多、成像速度快、可以实时成像等优点,但是面阵探测器在太赫兹波段的灵敏度还有待进一步提高。

Alan W. M. Lee 等^[7]于 2005 年进行了 2.52 THz 波段的面阵透射成像,利用一片反射棱镜、一片离轴抛物反射镜和一片锗透镜搭建成像光路,将被快递信封部分遮挡的刀片作为成像目标放

置在抛物镜后的聚焦光路中,将探测器放置在锗透镜后的近似平行光路上,获得了较为清晰的图像,单帧图像大小为 160 pixel × 120 pixel,文献中根据瑞利判据,衍射极限时角分辨率 $\theta = 1.22 \lambda/d$,将目标后的抛物镜尺寸和目标与镜面距离代入可以得到系统的分辨率极限为 1.5 mm。Alan W. M. Lee 等^[8]于 2006 年进行了 4.3 THz 的面阵透射和反射成像,使用两个离轴抛物反射镜和一个硅透镜搭建光路,探测器尺寸为 320 pixel × 240 pixel,对信封内部的铅笔字和指纹进行成像。国内的深圳大学进行

收稿日期: 2010-04-27; 收到修改稿日期: 2010-07-01

作者简介: 姚 睿(1985—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail: hi_rory@yahoo.com.cn

导师简介: 李 琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: hit_liqi@yahoo.com.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:S040350252M)

了 1.89 THz 面阵透射成像^[9],将人民币水印、螺母等目标直接放置在太赫兹辐射源后,透射光经过聚乙烯透镜聚焦后进入探测器成像。哈尔滨工业大学在 1.63, 2.45 和 2.52 THz 波段进行了面阵成像^[10~13],分别在不使用透镜^[12]和应用单片聚乙烯透镜聚焦^[10,11,13]的情况下进行简单的光路设计,由于最多只使用一片透镜,缺少更多的设计元素,因此成像质量会受到很大限制。

太赫兹成像系统的分辨率与波长、光学系统设计有关,也因成像体制的不同而有所区别。太赫兹点扫描成像系统的分辨率主要由扫描光斑的尺寸决定,通过共焦显微成像可以减小光斑尺寸,2.52 THz 连续气体激光器成像系统根据光斑尺寸定义的系统分辨率可以达到 0.31 mm^[14],0.3 THz 时域谱成像系统通过对分辨率板成像而定义的分辨率可以达到 0.25 mm^[15];而太赫兹面阵成像的分辨率主要由成像系统的衍射极限(由成像光束波长和成像光学系统口径确定)和面阵探测器的性能所决定,目前主要依靠对系统衍射极限下的分辨率进行理论计算,以及对某些目标的细节尺寸进行大概估计来确定分辨率。由于成像目标多种多样,且往往都是日常生活中的常见物品,因此对成像系统的分辨率没有较为准确的估计。本文对成像光路重新设计,增加了 3 个不同焦距的离轴抛物面反射镜,并利用印制电路板方法制作了具有不同规格条纹的分辨率板,可以对成像系统的分辨率做出较为准确的估计。

2 成像原理与实验装置

采用美国相干公司 SIFIR-50 CO₂ 抽运连续太赫兹激光器作为成像光源,由 CO₂ 激光抽运甲醇(CH₃OH)、二氟甲烷(CH₂F₂)或者一氯甲烷(CH₃Cl)产生不同波段的连续太赫兹光。此系统结构紧凑,输出较稳定,功率较高,而且易于操作。该激光系统在抽运甲醇产生 2.52 THz 光时,输出功

率较高,稳定性最好。其他常用波段有 2.24, 1.89 和 1.63 THz,但是稳定性稍差。实验中输出频率 2.52 THz,功率 50 mW。采用 Pyrocam III 热像仪作为面阵探测器,内嵌 48 Hz 斩波器,因此成像帧频为 48 Hz,图像尺寸为 124 pixel×124 pixel,实际尺寸为 12.4 mm×12.4 mm,搭建的成像系统如图 1(a)所示,M1, M2, M3 均为离轴抛物面反射镜, M1 焦距 5.08 cm, M2 焦距 10.16 mm, M2 焦点与太赫兹辐射经过 M1 聚焦后的焦斑位置重合,使得成像光束经过 M1 和 M2 后扩束,扩大成像面积,扩束后光束能够较为均匀地照射到目标表面,而且扩束后光束的发散角很小。成像目标放置在 M2 和 M3 之间,位置可以灵活调整且对后续的成像效果不会有较大影响,物像的比例关系也比较固定,移动目标后只需调节面阵探测器的位置即可重新得到清晰的图像。经过目标后的透射光经过 M3 和聚乙烯透镜 M4 后发散角较小,且能够完全入射到面阵探测器光敏面上, M3 焦距 15.24 cm, M4 焦距 12 cm,进入探测器的光斑接近热像仪光敏面尺寸,能够充分利用探测器的有效面积,且能够观察到强度较强的光斑,如图 1(b)所示。由瑞利判据,衍射极限时角分辨率 $\theta=1.22 \lambda/d$,系统中 M3 的直径为 4 cm,光斑并没有完全覆盖 M3,照射到 M3 时的光斑直径理论值为 3 cm,目标与 M3 距离 4 cm,因此系统极限分辨率为 0.2 mm。

采用的 90°离轴抛物面镜在理论上可以消除球差的影响^[16],得到高质量的光斑,但是调整难度大,对光轴失准的敏感度高,细微的偏差会引发像散,实验中使用搭建的 4 轴精密调整架对每一块抛物面镜进行精密调节,通过氦氛激光进行辅助调节,利用面阵探测器观察太赫兹的光斑质量,从而最大程度地避免光轴失准。也可以采用非球面镜^[17],避免球差对分辨率产生的影响,提高系统分辨率。

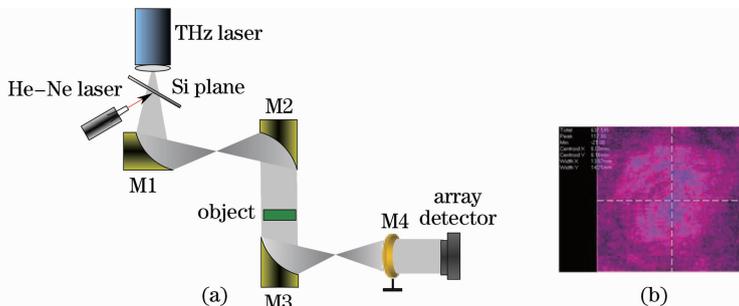


图 1 成像系统框图(a)及探测器光斑(b)

Fig. 1 Imaging system (a) and the spot image in the detector (b)

3 成像结果与分辨率分析

在 1 mm 厚铝片上加工出 HIT 的镂空字母, 字母宽度 2 mm, H 整体高度 8 mm, 宽度 7 mm, 如图 2 所示。



图 2 成像目标 HIT 实物图

Fig. 2 White-light image of the target

对字母 H 成像结果如图 3 所示。成像过程中, 激光器输出会产生波动, 而且由于热像仪的响应光谱很宽, 探测灵敏度有限, 因此会产生随机噪声。为了在一定程度上消除这种随机波动噪声, 连续取 5 帧图像并进行叠加平均处理, 5 帧图像叠加平均后再经过对比度拉伸后的原始图像如图 3(a) 所示。经过像素点计算, 成像结果中字母 H 的尺寸比例接近实物的比例, 成像变形较小。选择塑料材质的快递信封[图 3(b)所示]和一张 A4 纸分别作为遮挡物进行隐藏物的探测成像, 结果如图 3(c)和(d)所示。由于 A4 纸对太赫兹的透射率相对较低, 所以图 3(d)中图像对比度稍低, 但仍然可以清晰地观察到字母 H。



图 3 透过遮挡物的成像结果。(a)原始图像,(b)快递信封实物照,(c)透过信封成像结果,(d)透过 A4 纸成像结果

Fig. 3 Imaging results of letter H. (a) original image, (b) photo of envelop, (c) THz image through envelop, (d) THz image through A4 paper

对 5 元, 20 元的人民币水纹印进行 5 帧叠加平均成像, 并经过直方图均衡化处理进行图像增强, 结果如图 4(b)和图 5(b)所示, 能够清晰地分辨出 5 和 20 的轮廓, 与原有的成像结果^[12,13]相比 [如图 4(c), 图 5(c)和(d)所示], 现有成像结果形状轮

廓和比例关系更接近实物, 失真较小, 无衍射现象, 且轮廓较为完整。另一方面, 现有的成像系统中探测器中光斑尺寸更大而光斑中的目标尺寸更小, 因此有效成像面积更大。

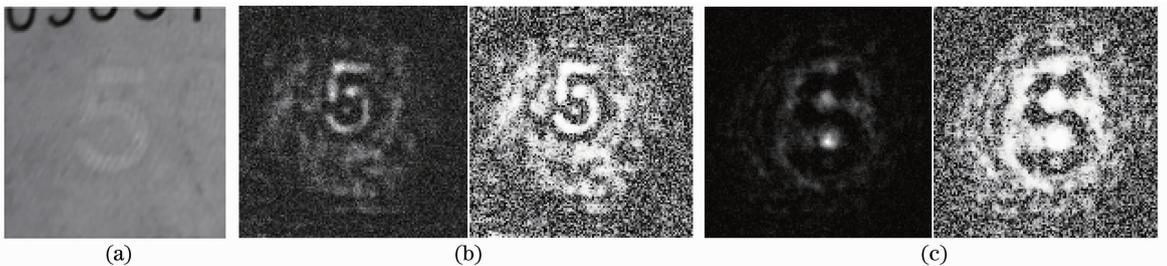


图 4 5 元人民币水纹成像结果对比。(a)实物图,(b)太赫兹图像及直方图均衡化处理,(c)原有图像及直方图均衡化处理

Fig. 4 Imaging results comparison of ¥5. (a) white-light image, (b) THz image and histogram equalization, (c) original image and histogram equalization

对成像系统改进前后的 20 元水纹成像结果进行直方图分析, 如图 6 所示。可以看到, 经过改进后, 图像灰度级的动态范围更广, 对比度更高, 因此成像质量更好。

为了对整个成像系统的分辨率有一个比较准确的估计, 对成像目标进行设计, 制作分辨率板。由于

机械加工的方法较难实现小尺寸的微细加工, 成本很高, 因此采用印制电路板方法, 在 0.5 mm 厚的聚乙烯板上印制不同宽度的金属覆铜, 如图 7 所示。太赫兹辐射可以透过聚乙烯薄板, 但无法透过覆铜。条纹宽度分别为 0.2, 0.4, 0.6 和 0.8 mm。

首先对 0.8 mm 条纹进行成像, 仍为 5 帧叠加

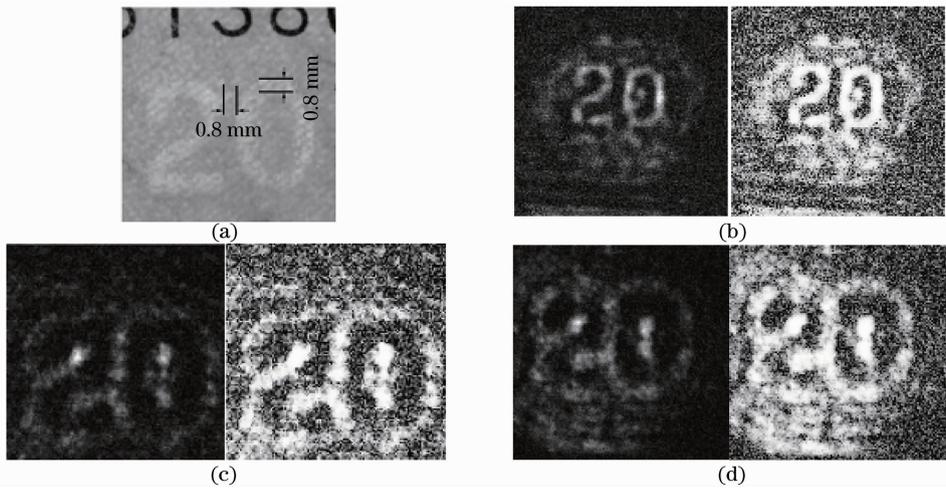


图 5 20 元人民币水印成像结果对比。(a)实物图,(b)太赫兹图像及直方图均衡化处理,(c)原有图像及直方图均衡化处理,(d)原有图像及使用单片聚乙烯透镜聚焦的成像结果

Fig. 5 Imaging results comparison of ¥20. (a) white-light image, (b) THz image and histogram equalization, (c) original imaging and histogram equalization, (d) original imaging and image by using a polyethylene lens

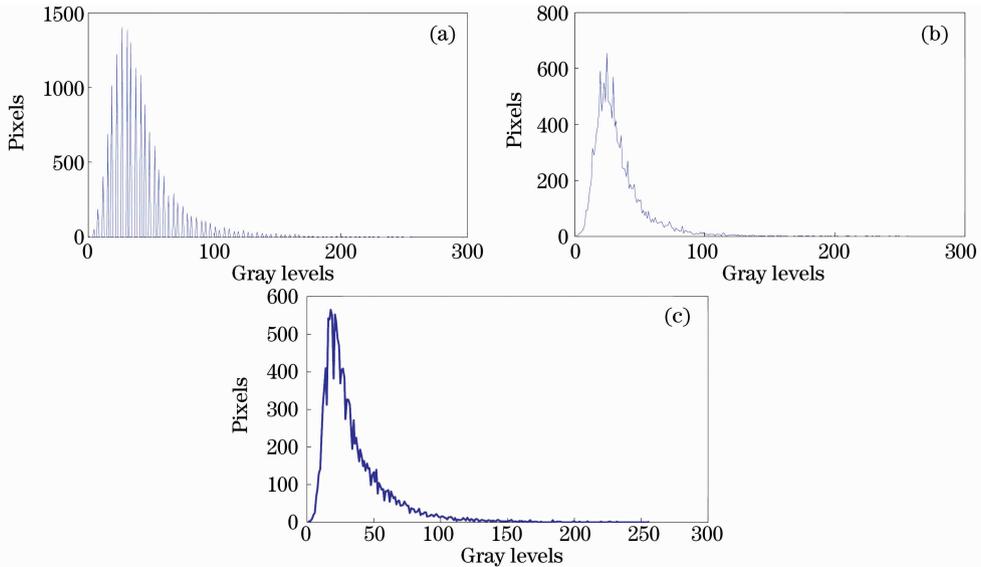


图 6 20 元水印直方图比较。(a)现有成像结果图 5(b),(b) 原有成像结果图 5(c),(c)原有成像结果图 5(d)

Fig. 6 Histogram comparison of ¥20. (a) present image in Fig. 5(b), (b) original image in Fig. 5(c), (c) original image in Fig. 5(d)

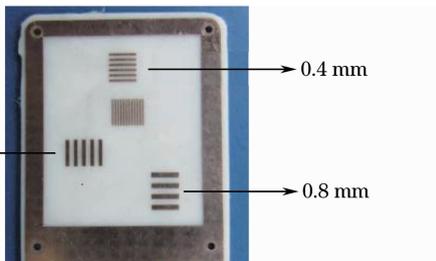


图 7 印制分辨率板

Fig. 7 Printed resolution board

后取平均值,成像结果如图 8 所示,可以比较清晰地分辨出 4 条暗条纹和其中间所夹的 3 条亮条纹。选取条纹中部的第 60 行像素进行分析,第 60 行像素

的灰度级分布如图 9 所示,图中两条虚线中间的部分是条纹成像区域,灰度级较低处为太赫兹不能透过的覆铜,较高处为覆铜之间的空隙,明暗条纹的灰度级变化十分明显,整个成像系统的分辨率应该在 0.8 mm 以上。

对 0.6 mm 宽的条纹进行成像,成像结果如图 10 所示,仍然可以分辨出 5 条暗条纹和其中的 4 条亮条纹。选取第 61 行像素点分析其灰度级分布,如图 11 所示,从灰度级分布图中依然可以直观地分辨出条纹分布,因此整个成像系统的分辨率可以达到 0.6 mm。对 0.4 mm 条纹进行成像,条纹杂乱不

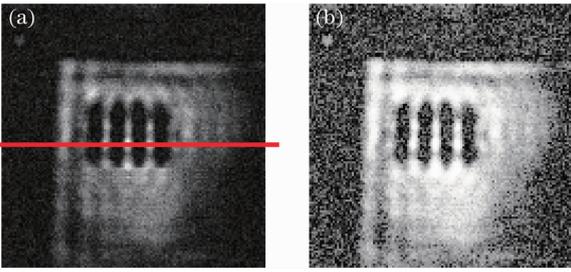


图 8 0.8 mm 条纹成像结果。(a)原始图像,
(b)直方图均衡化

Fig. 8 Imaging results of 0.8 mm fringe on the resolution board. (a) original image, (b) histogram equalization

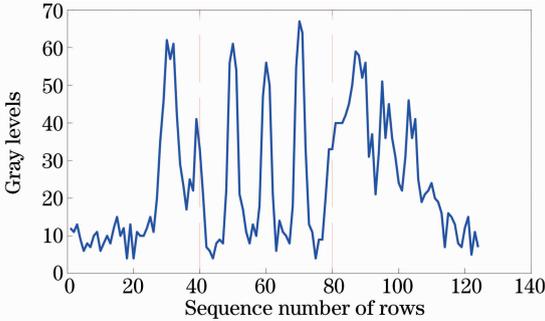


图 9 单行像素的灰度级分布

Fig. 9 Gray levels distribution of single line pixels

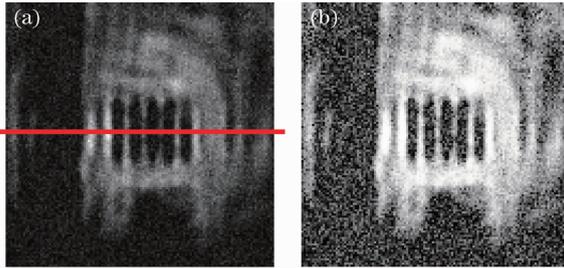


图 10 0.6 mm 条纹成像结果。(a)原始图像,
(b)直方图均衡化

Fig. 10 Imaging results of 0.6 mm fringe on the resolution board. (a) original image, (b) histogram equalization

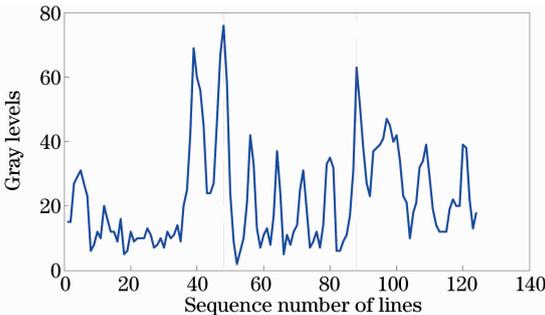


图 11 单行像素的灰度级分布

Fig. 11 Gray levels distribution of single line pixels

清,已经无法正常分辨,因此本成像系统无法分辨小于 0.4 mm 的尺寸,与分辨率极限 0.2 mm 有一定差距,这主要与光学系统的调节精度以及面阵探测

器的性能有关。由于目前所采用的热像仪光谱响应范围宽,在太赫兹波段的探测灵敏度不高,因此存在许多随机噪声,信噪比不高。在透过条纹间距很小的分辨率板时,透射光较弱,很容易湮没在噪声中,这样在图像中很难分辨出 0.4 mm 以下的条纹,通过数据也无法分辨出正常的波峰和波谷。通过多帧叠加可以在一定程度上抑制随机噪声,但同时也会影响成像速度。

4 结 论

在原有太赫兹面阵成像系统的基础上进行光路重新设计和优化,添加了多个离轴抛物面反射镜,使得有效的成像范围增加,成像目标的位置也更加灵活,成像质量更好。分别对镂空有“H”字母的金属板和人民币水印进行成像实验,通过多帧叠加平均和直方图均衡化得到了清晰的图像。使用印制电路板的方法在聚乙烯板上覆着不同宽度的铜条纹,制作了不同规格的分辨率板,并对其进行成像,对成像结果进行分辨率分析,整个成像系统的分辨率可以达到 0.6 mm。

参 考 文 献

- 1 B. Pradarutti, S. Riehemann, G. Notni *et al.*. Terahertz imaging for styrofoam inspection [C]. *SPIE*, 2007, **6772**: 67720P
- 2 J. F. Federici, Brian Schulkin, Feng Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications-explosive, weapons, and drugs[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): S266~S280
- 3 P. C. M. Planken, H. J. Bakker. Towards time-resolved THz imaging[J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **78**(4): 465~469
- 4 Hua Zhong, Nick Karpowicz, Jason Partridge *et al.*. Terahertz wave imaging for landmine detection [C]. *SPIE*, 2004, **5411**: 33~44
- 5 V. S. Cherkassky, B. A. Knyazev, V. V. Kubarev *et al.*. Imaging techniques for a high-power THz free electron laser[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2005, **543**(1): 102~109
- 6 T. Kleine-Ostmann, P. Knobloch, M. Koch *et al.*. Continuous-wave THz imaging [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(24): 1461~1463
- 7 Alan Wei Min Lee, Qing Hu. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2563~2565
- 8 Alan W. M. Lee, Benjamin S. Williams, Sushil Kumar *et al.*. Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320×240 microbolometer focal-plane array[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(13): 1415~1417
- 9 Jun Yang, Shuangchen Ruan, Min Zhang. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by a pyroelectric camera[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 29~31
- 10 Rui Yao, Qi Li, Qi Wang. 1.63-THz transmission imaging experiment by use of a pyroelectric camera array[C]. *SPIE*, 2009, **7277**: 72770D
- 11 Rui Yao, Qi Li, Shenghui Ding *et al.*. Investigation on 2.45-THz

- array transmission imaging[C]. *SPIE*, 2009, **7385**: 73850P
- 12 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. Preliminary study on 2.5 THz array real-time imaging and image processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 275~277
李 琦, 姚 睿, 单纪鑫等. 基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 275~277
- 13 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin *et al.*. Preliminary study on 2.5 THz array real-time imaging and image processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 84~88
李 琦, 姚 睿, 单纪鑫等. 2.5THz 面阵实时成像及图像处理初步研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 84~88
- 14 Mohammed Adnan Salhi, Ioachim Pupeza, Martin Koch. Confocal THz laser microscopy[J]. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2010, **31**(3): 358~366
- 15 N. N. Zinov'ev, A. V. Andrianov, A. J. Gallant *et al.*. Contrast and resolution enhancement in a confocal terahertz video system[J]. *JETP Lett.*, 2008, **88**(8): 492~495
- 16 Luo Xi, Chen Peifeng, Wang Ying. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 682~687
罗 曦, 陈培锋, 王 英. 离轴 90°抛物面镜焦斑特性分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 682~687
- 17 Qian Song, Albert Redo-Sanchez, Yuejin Zhao *et al.*. High speed imaging with CW THz for security [C]. *SPIE*, 2009, **7160**: 716016