

太赫兹共焦扫描显微成像研究进展

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 随着太赫兹(THz)技术的发展,许多改善成像质量和拓展成像维度的方法不断应用到 THz 成像领域,其中有许多是借鉴了在其他波段已发展成熟的技术手段,这些技术与 THz 成像的结合,已成为当前研究的一个热点领域,THz 共焦扫描显微成像技术即是其中之一。在介绍共焦扫描显微成像原理的基础上,阐述并分析比较了国内外 THz 共焦扫描显微成像技术的发展状况,这些研究展示了 THz 共焦扫描显微成像技术广阔的应用及发展前景。

关键词 成像系统;激光显微镜;太赫兹成像;共焦扫描

中图分类号 TH742.64

OCIS 110.6795 180.1790 180.5810

文献标识码 A

Advances in Research of Confocal THz Scanning Microscope

Li Qi Ding Shenghui Yao Rui Wang Qi

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

Abstract With the development of THz technology, a lot of suggestions and concepts have been proposed to improve the imaging quality or extend the imaging dimensions in the field of THz imaging. Most of them are borrowed from the fully developed techniques in other wavelength ranges. The combination of these techniques and THz imaging has become a current research focus, and confocal THz scanning microscope is such a technique among them. Based on an introduction to the principle of confocal scanning microscope, a comprehensive description of the advances in the domestic and international research of confocal THz scanning microscope is provided, which illustrate the exciting potential uses for this emerging technique.

Key words imaging systems; laser microscope; THz imaging; confocal scanning

1 引言

太赫兹(THz)技术是 21 世纪重大研究发展方向之一,涉及面非常广泛^[1~7],其中 THz 辐射成像因在危险品检测、医疗和食品检验等领域有广阔的应用前景,已被广泛重视^[8~16]。THz 成像方式主要有时域谱成像、连续波成像、层析成像、全息成像和显微成像等。由于 THz 辐射较可见光波长长,一般成像方式受到衍射的限制。因此,THz 成像的分辨率一般只能达到亚毫米量级。而显微成像方式原理上可突破衍射极限,即达到超分辨,因此 THz 共焦扫描显微成像引起学者的广泛关注。THz 共焦扫描显微成像是通过减小视场,即缩小目标被照明的区域,提高横向和纵向分辨率。与一般远场 THz 成像相比,它具有以下两大特点:

1) 由于点探测接收,可去除绝大部分杂散光的影响,获得较清晰的图像。主要接收来自共焦面上的信息,可减少视场背景的干扰信号,使图像对比度提高;

2) 可提高横向分辨率和轴向分辨率,因此可获得轴向距离切片图像,从而得到物体的三维图像。

光学共焦扫描显微成像,在 20 世纪 70 年代开始被细致研究;90 年代至今成为三维成像研究前沿之一^[17]。THz 共焦扫描显微成像,是 THz 技术与共焦扫描显微成像技术的结合,是当今 THz 成像技术的前沿之一。本文介绍 THz 共焦扫描显微成像的原理和研究进展,为我国进一步开展此项研究提供技术参考。

收稿日期: 2010-03-05; **收到修改稿日期:** 2010-04-02

作者简介: 李琦(1963—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光主动成像及太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: hit_liqi@yahoo.com.cn

2 共焦扫描显微成像原理

THz 共焦扫描成像是利用光学共焦显微镜原理逐点扫描成像,其中将光源用 THz 辐射源替代。此类成像系统主要包括共焦光学子系统、扫描子系统、探测器、计算机及控制软件等。

共焦显微成像在实际运用中包括两种方式,即透射共焦方式及反射共焦方式,原理如图 1 所示。反射共焦扫描系统可看作是将透射式系统折叠起来的情况。靠近光源的第一个透镜称为物镜,它的作用是在样品上形成一个衍射受限的照明;第二个透镜称为收集镜,它的作用是将微弱的样品信号收集到一个小的探测器上。

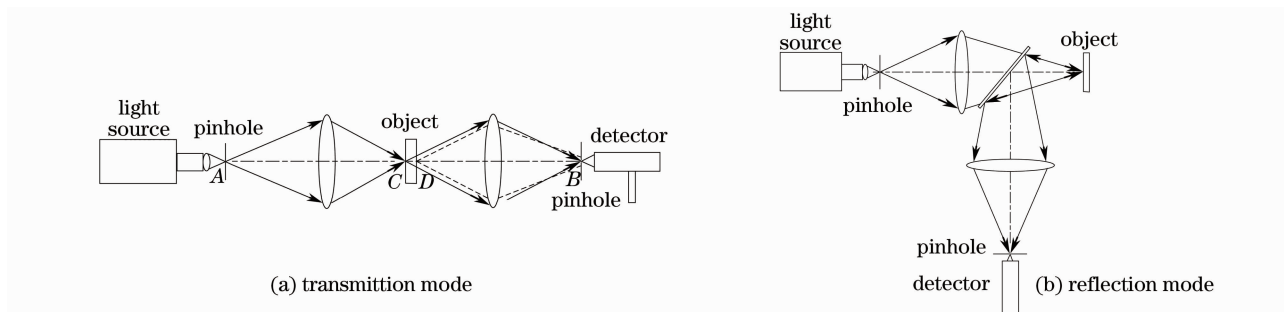


图 1 共焦显微成像原理示意图

Fig. 1 Principle of confocal microscope

以透射型共焦扫描方式为例,物镜将第一个小孔 A 成像至 C 上,而收集镜则在小孔 B 处形成 C 的像,即 A, B, C 三点共焦;对于离焦点 D ,由于其未与小孔 A 的像对准,因此所受光照强度较弱,并且该点发出的信号不能完全通过小孔 B ,减小探测器所接收到的离焦点的信息,进而提高了系统的纵向分辨本领。此外,当小孔 B 的尺寸足够小时,还能够消除光斑在 C 点处衍射环的影响,提高了系统的横向分辨率。利用共焦扫描系统的纵向分辨本领,可以对物体不同截面的断层进行成像,从而形成样品的三维像。

当两小孔的尺寸都非常小,即系统可看作是点光源及点探测时,系统的点扩展函数为物镜与收集镜的点扩展函数的乘积^[17]

$$h_a(\mathbf{r}) = \exp[ik(-z \pm z)]h_1(M_1\mathbf{r})h_2(\mathbf{r} + M_2\mathbf{r}_2), \quad (1)$$

式中 M_1 和 M_2 为物镜(收集镜)的放大率, \mathbf{r}, \mathbf{r}_2 分别为物空间及探测器空间的位置矢量。± 则对应反射及透射式的扫描方式。由于系统的点扩展函数为乘积关系,而不是一般串联光学系统的卷积关系,因此总的点扩展特性得到改善,使得系统的分辨率优于一般的显微系统。

3 国内外研究状况及分析

2006 年 M. A. Salhi 等^[18]利用自制 CO_2 抽运连续 THz 激光器(波长 $118.83 \mu\text{m}$)进行了半共焦透射扫描成像,图 2 给出了其成像示意图,同时提出下一步将进行共焦扫描成像。图 2 中,出射的 2.52 THz 辐射经分束片分成两路,一路参考光,一路信号光。参考光由透镜聚焦到参考探测器上。信号光经反射镜聚焦到共焦针孔上,再照射到样品上。透过样品的信号光再经反射镜平行出射,最后经一透镜聚焦到另一共焦针孔上,进入 Golay 探测器中。共焦针孔起到空间滤波作用,即只允许焦点上的光束成像,以提高图像分辨率。样品放置在二维移动平台上,通过二维平台的移动,实现样品的二维成像。此半共焦扫描成像装置中,由于第一个共焦针孔放置在物体前,且紧贴着物体,因此不可能进行三维成像。

2008 年, M. A. Salhi 等^[19]发表了共焦扫描成像实验结果,图 3 给出他们的实验装置图,由 CO_2 激光抽运的连续 THz 激光器出射的 2.52 THz 光束经离轴抛物面镜和焦距 25 mm 的透镜(物镜)聚焦到直径为 1 mm

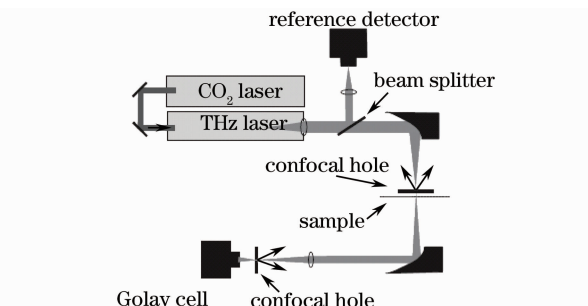


图 2 半共焦扫描装置图

Fig. 2 Experimental setup for semi-confocal scanning

的共焦针孔上,由焦距 50 mm 透镜聚焦到样品上;再由样品透射的 THz 辐射经收集镜聚焦到直径为 0.7 mm 的共焦针孔中,最终进入 Golay 探测器。样品置于二维移动平台上,通过平台移动,实现共焦扫描成像。

图 4 给出了他们的实验结果。对在两片特制的对 THz 和可见光均可透过的高密度聚乙烯(PE)板中夹有砂粒进行共焦扫描显微成像实验,且与普通的 0.3~0.4 THz 时域谱成像结果进行了对比。图 4(a)为成像样品照片,可见砂粒分布不均匀;图 4(b)为成像样品三维示意图;图 4(c)为 THz 时域谱成像结果;图 4(d)为利用文中提及的共焦扫描显微实验装置成像结果。由图 4(d),(c)对比可见,2.52 THz 共焦扫描显微成像较 0.3~0.4 THz 时域谱成像分辨率有较大提高^[19]。

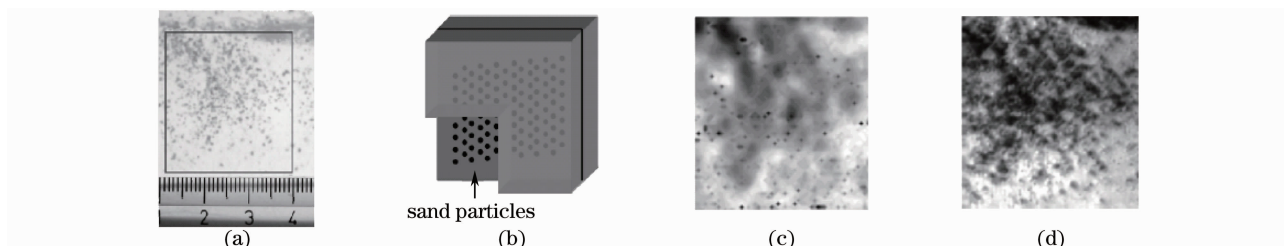


图 4 砂粒成像结果

Fig. 4 Imaging results of sand sample

同年, M. A. Salhi 等^[20]指出他们的 2.52 THz 共焦扫描显微成像空间分辨率达到 0.26 mm。图 5 给出对内含芯片的聚合物卡成像结果。图 5(a)为焦距与束宽的测量关系,焦点处束宽 0.26 mm;图 5(b)为成像样品照片;图 5(c)为以 0.35 THz 为中心频率的时域谱成像结果;图 5(d)为共焦扫描显微实验装置成像结果。由图 5(d),(c)对比可见,2.52 THz 共焦扫描显微成像较 THz 时域谱成像分辨率有很大提高^[20]。

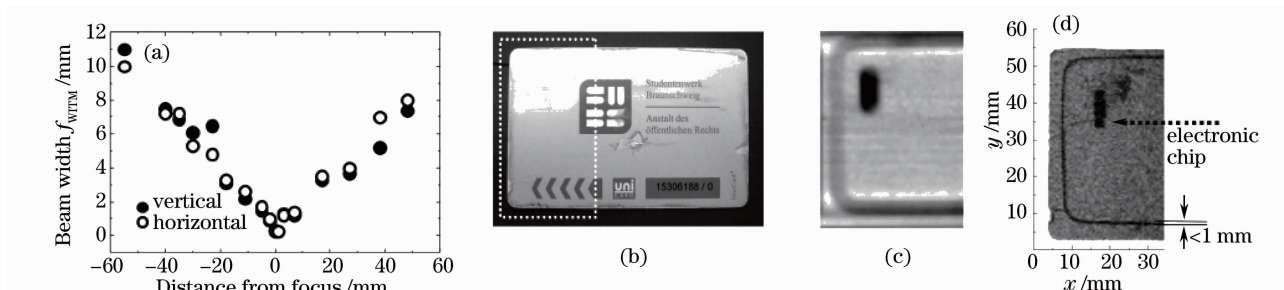


图 5 含芯片的聚合物卡成像结果

Fig. 5 Imaging results of a polymer card

2009 年, M. A. Salhi 等^[21]发表了共焦扫描显微成像实验结果。图 6 给出他们的实验装置图,与文献[19]不同的仅是探测器前的共焦针孔为 0.5 mm,比文献[19]中的针孔小 0.2 mm。

图 7 给出了他们对 100 元纸币水印的成像实验结果^[21]。图 7(a)放在有刮痕的 PE 板前的 100 元纸币照片,加 PE 板的作用是增加散射效果,图中左下角矩形为扫描区域;图 7(b)为共焦成像局部示意图;图 7(c)为利用文中提及的共焦扫描显微实验装置成像结果;图 7(d)为将探测器前针孔打开时的成像结果;图 7(e)为图 7(c)和图 7(d)所示水平线处的强度比较。显然共焦成像效果明显优于非共焦成像。

2008 年, N. N. Zinov'ev 等^[22]共同提出的成像装置

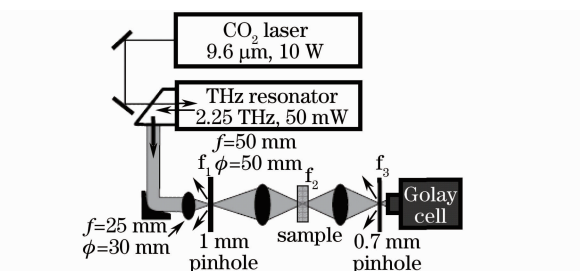


图 3 共焦扫描实验装置 1

Fig. 3 Experimental setup 1 of confocal scanning

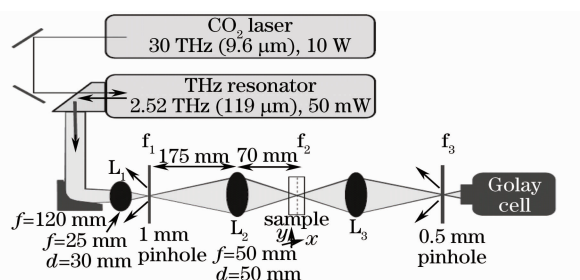


图 6 共焦扫描实验装置 2

Fig. 6 Experimental setup 2 for confocal scanning

和 THz 辐射穿过样品过程的模型设计如图 8 所示。图 8(a)中,光路上的实线表示钛宝石激光,虚线表示光导天线(供电电压150 V)产生的 THz 辐射,由于光导天线的尺寸 $a \ll \lambda_{\text{THz}}$,因此 THz 源可认为是点光源;离轴抛物面镜 M1 和 M2 构成物镜,将 THz 辐射聚焦到样品层中;离轴抛物面镜 M3 和 M4 构成收集镜,在 3 处聚焦从样品中透过的 THz 辐射;3 处放置共焦针孔,滤波;离轴抛物面镜 M5 和 M6 构成另一套收集镜,将 THz 辐射聚焦于 ZnTe 中。图 8(b)成像中 THz 辐射先后穿过样品 N1,N2 和 N3。样品是由镀在硅基片的 Cr 层构成的不同频率的光栅阵列,3 块样品的间距均为 3 mm。图 9 给出飞秒 THz 脉冲波形和频谱^[22]。1 和 2 分别表示共焦孔打开和最小(孔径1.2 mm)时的电场幅度曲线,可见,小孔的插入没有改变 THz 脉冲的频率成分。实验通过 ZnTe 晶体的光电效应来测量 THz 电场,以 THz 脉冲波形中的振幅峰值进行成像,其扫描步长为 0.1 mm。

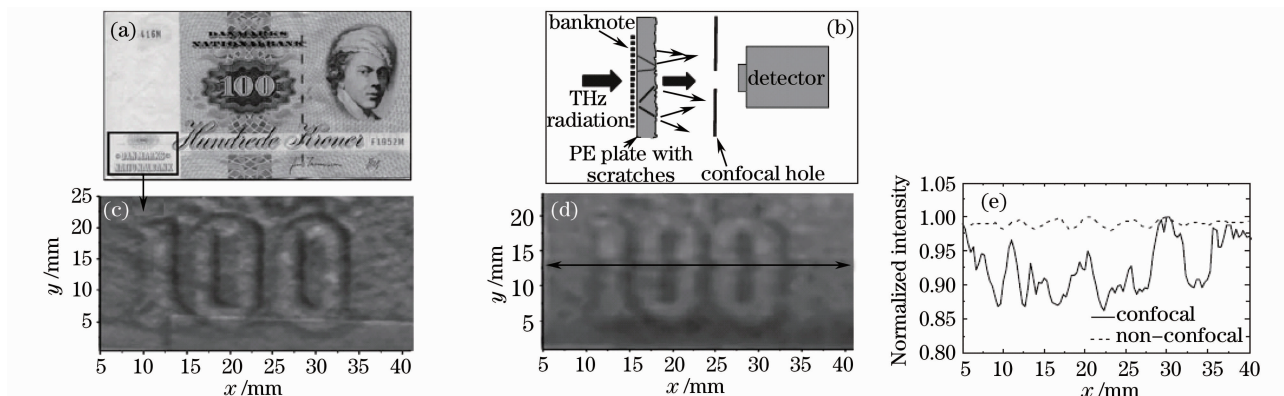


图 7 共焦扫描实验结果

Fig. 7 Results of confocal scanning experiment

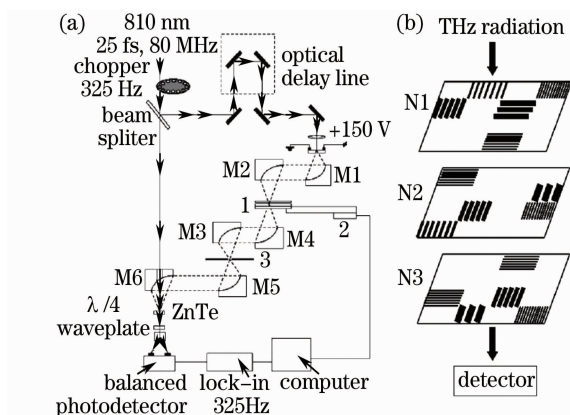


图 8 文献[22]中提出的共焦扫描显微成像装置

Fig. 8 Confocal scanning microscope setup proposed in Ref. [22]

2009 年, N. N. Zinov'ev 等^[23]发表了共焦 THz 成像文章。图 10 给出他们的成像原理,与文献[22]相同。由飞秒激光器激发光导天线产生的 THz 点源辐射由透镜 O_1 聚焦到样品上 (F_0 区域),透过的辐射被收集镜 O_2 聚焦,在此焦点处放置针孔 D,进行空间滤波,随后由收集镜 O_3 聚焦透过针孔的辐射,此焦点正好在探测器中。样品也与文献[22]相同,成像中 THz 辐射先后穿过样品 N1,N2 和 N3,样品的间距仍为 3 mm。文献[23]是在文献[22]的基础上,进行了理论推导和较深入的成像实验研究。

图 11 给出证明横向分辨率增强的实验结果^[23],N2 置于焦平面 F_0 处。图 11(a)左右分别显示共焦针孔打开和为 1.2 mm 情况下的成像结果;图 11(b)为对应图 11(a)中水平线位置的振幅分布,曲线 1 代表右侧的

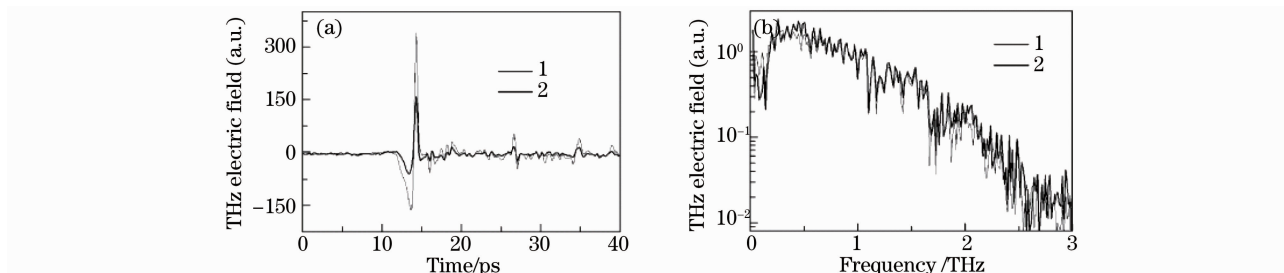


图 9 THz 脉冲波形和频谱

Fig. 9 Waveform and spectrum of THz pulse

图像,曲线 2 代表左侧的图像。在 $x=3\sim 7$ 之间,即宽度和间隔均为 $250\ \mu\text{m}$ 的光栅区域,曲线 1 的振幅最小值与最大值比率平均为 0.76,根据瑞利判据,当该比值小于 0.811 时,说明该结构能够被分辨开。

图 12 给出轴向分辨率增强的实验结果^[23],N2 置于焦平面处,N3 偏离焦平面,对比相同光栅频率下 N2 和 N3 成像结果。图 12(a)上下分别显示 N2 和 N3 的成像结果;图 12(b)为对应图 12(a)中水平线位置的振幅分布,曲线 1 代表对 N2 的成像结果,曲线 2 代表对 N3 的成像结果。曲线 1 的振幅最小值与最大值比率平均为 0.65,而曲线 2 的振幅最小值与最大值比率平均为 0.98,即共焦孔的加入使得成像系统的轴向分辨率及对比度都得到加强。

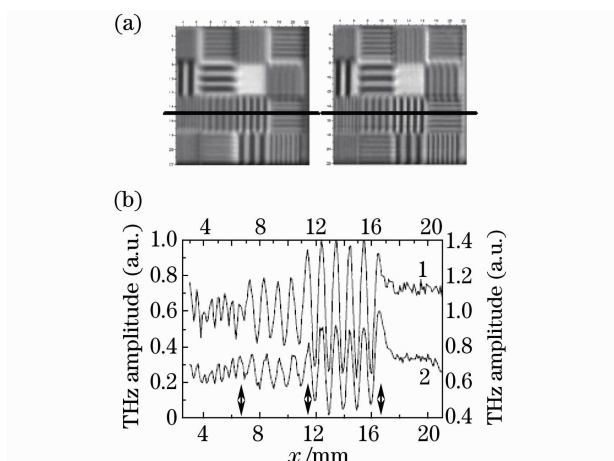


图 11 横向分辨率增强

Fig. 11 Improvement of lateral resolution

M. Lim 等^[24]2008 年给出了反射式共焦扫描显微成像实验结果。图 13 为成像装置图^[24],图 14 为样品表面成像结果^[24]。实验装置由 THz 源、三个透镜、分光片、针孔和探测器组成。透镜 L1 用于准直,透镜 L2 用作物镜,透镜 L3 用作收集镜。实验中样品为带有矩形沟槽的良导体,THz 源波长为 $300\ \mu\text{m}$ 。通过振动物镜,调制照射在样品上 THz 束。针孔放置在收集镜的焦平面处。探测器同时测量振幅和相位信息。从图 14 中可以看出物体表面大致轮廓。经计算若选择合适的小孔则系统空间分辨率可达 $400\ \mu\text{m}$ 。

我国开展 THz 成像研究的单位很多,据我们调研情况,已经进行共焦扫描显微成像研究的单位有首都师范大学和哈尔滨工业大学。

张艳东^[25]利用耿氏振荡器产生的 $0.2\ \text{THz}$ 辐射(波长 $1.5\ \text{mm}$),通过相干探测,获得反射图像。其中共焦孔直径 $2\ \text{mm}$,实际测得轴向分辨率 $25.5\ \text{mm}$ 。图 15,16 分别为实验装置照片及光路图和沿轴向不同位置(10,17,23 cm)对泡沫板的成像结果。由于选取的成像波段波长较长,且共焦孔的尺寸较大,因此获得的分辨率不高^[25]。

哈尔滨工业大学本研究组,利用美国相干公司生产的连续 THz 气体激光器 SIFIR-50 FPL 和美国生产的 P4-42 型热释电探测器进行了 $2.52\ \text{THz}$ 共焦扫描成像初步实验,实验按照图 1 中的透射式共焦装置图布置光路,其中 A 处小孔的尺寸为 $1.2\ \text{mm}$,B 处小孔的尺寸为 $0.6\ \text{mm}$,样品位于两透镜的共焦面上。加入小孔后系统的横向分辨率得到明显改善,图 17 给出对金属片的成像结果,易见系统对金属片的细节部分($< 0.25\ \text{mm}$)也能够成像。

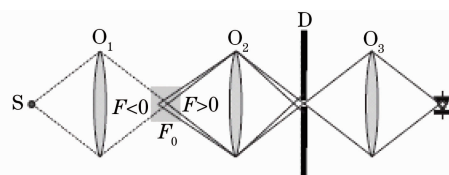


图 10 N. N. Zinov'ev 等提出的成像原理

Fig. 10 Imaging setup proposed by N. N. Zinov'ev et al

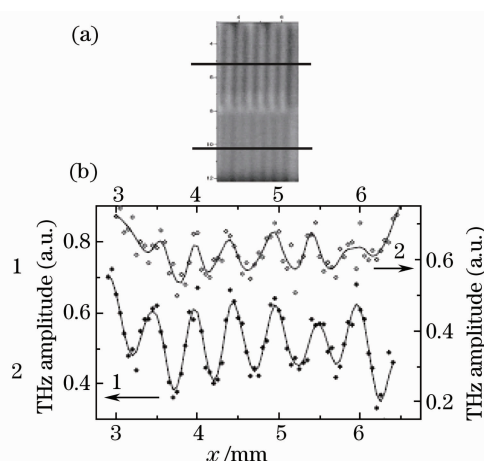


图 12 轴向分辨率增强

Fig. 12 Improvement of axial resolution

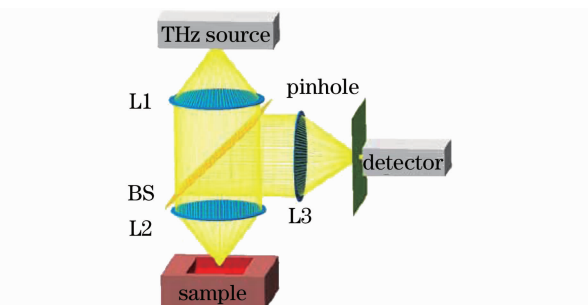


图 13 M. Lim 等提出的成像装置图

Fig. 13 Imaging setup by M. Lim et al

对上述研究结果的综合比较如表 1 所示。在 THz 共焦显微技术的研究中,连续 THz 源以及脉冲 THz 源都有被使用,从成像原理上比较,两种系统并无不同,区别主要在于 THz 的产生以及探测手段。与脉冲 THz 波成像系统相比,连续 THz 波成像系统往往比较紧凑、设计简单、成本较低,且扫描速度快,成像所需时间较短。由于光学系统成像的分辨率受到光波长的限制,因此理论上高频 THz 波能够实现更高的成像分辨率,而目前连续 THz 激光器的发展较为迅速,可供选择的波段较丰富,因此可以通过选择高频 THz 波来提高成像分辨率,如使用 CO₂ 抽运气体 THz 激光器在 2.52 THz 波段进行成像。使用脉冲 THz 时域测量系统能够获得成像物体的光谱信息,但由于成像信息量大,需要耗费较长的时间来采集数据,若使用频域模式进行成像,扫描时间可能长达 10 h^[26];使用时域模式进行成像,虽然能够减少成像时间,但由于任一时域信息都是样品对频域中所有频率成分影响的综合反映,是一个平均效果,而 THz 脉冲的中心频率往往都低于 2 THz,故成像分辨率受其中心频率限制。因此在 THz 共焦显微扫描技术的研究中,考虑到成像速度以及提高工作频率等因素,连续 THz 光源更具有优势,但如需获得物体的光谱信息,则需使用脉冲 THz 光源。

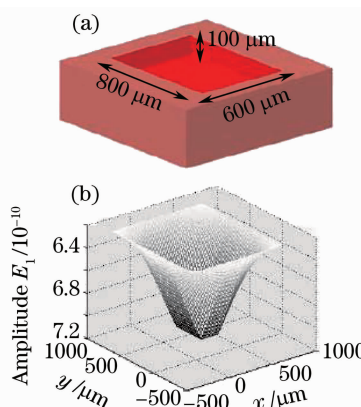


图 14 样品表面成像结果
Fig. 14 Imaging result of sample surface

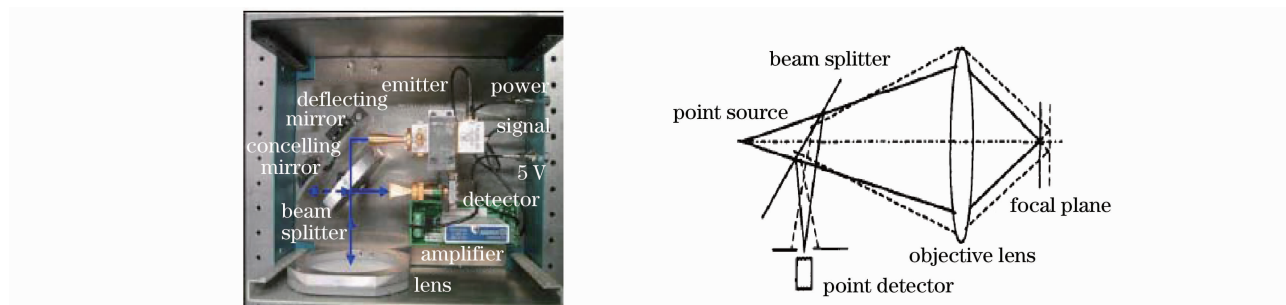


图 15 实验装置照片及光路图
Fig. 15 Experimental setup

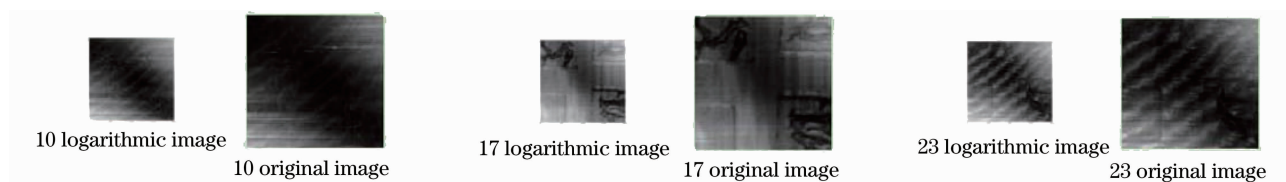


图 16 Foam 板成像结果
Fig. 16 Imaging results of foam board

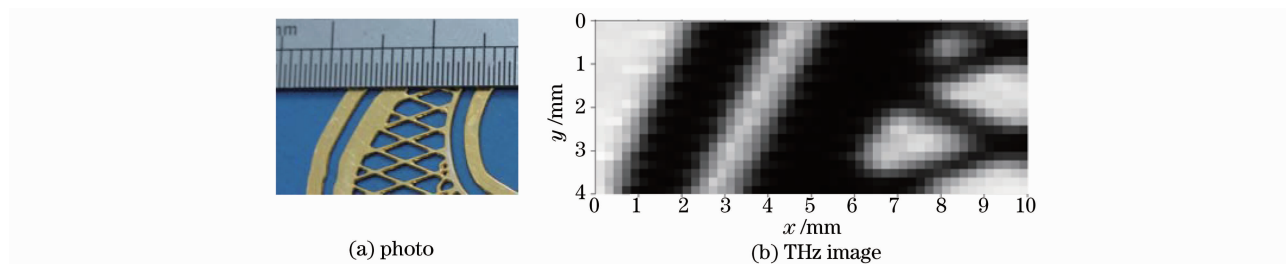


图 17 金属片共焦扫描显微成像结果
Fig. 17 Confocal scanning result of a sheet metal

表 1 各研究组实验结果的对比
Table 1 Comparison of experimental results

	THz source	Frequency/ THz	Experimental result (resolution) /mm
German	Continuous wave (optically pumped gas laser)	2.52	Lateral: 0.26
Russian	Pulsed(photoconductive antenna)	0.1~3	Lateral: 0.25 Axial: > 3
Korean	Continuous wave	1	Lateral: 0.4
Capital Normal University, China	Continuous wave(Gunns)	0.2	Lateral: 2.7 Axial: 25.5
Harbin Institute of Technology, China	Continuous wave (optically pumped gas laser)	2.52	Lateral: 0.25

4 结 论

将光学共焦扫描显微的原理应用于 THz 成像技术,可以使成像质量有较大改进,提高了图像的对比度以及横向分辨率。此外,由光学共焦显微术引入的轴向分辨率也可以应用于 THz 成像领域,获得物体的轴向断层图像,从而重构物体的三维结构信息,因此 THz 共焦扫描显微技术具有广阔的应用发展前景。目前无论是利用脉冲 THz 源,还是连续的 THz 源,实验得到的横向分辨率都集中在 0.2~0.3 mm 之间,而纵向分辨率的提高则较少见报道。分辨率的提高需要减小在光路中共焦小孔的孔径尺寸,但将降低探测器接收到的功率。因此该技术的发展也需要辐射源功率或是探测器灵敏度的提高。此外,为了在获得横向和轴向高分辨率的同时尽量提高探测器的接收功率,需要设计合适的光路使得系统具有足够高的数值孔径以及恰当的小孔孔径;因此,合理的光路设计也是在研究中需要解决的关键问题。为了实现对物体的三维断层成像,需要进一步提高 THz 共焦显微成像技术的轴向分辨率。作为一项新兴的技术,THz 共焦显微成像技术显示了巨大的发展潜力及广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Liu Shenggang. Recent development of terahertz science and technology[J]. *China Basic Science*, 2006, (1): 7~12
刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, (1): 7~12
- 许景周, 张希成著. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社. 2007
- W. L. Chan, J. Deibel, D. M. Mittleman. Imaging with terahertz radiation[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2007, **70**(8): 1325~1379
- Zhao Shusen, Chen Sijia, Shen Jingling. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drugs using support vector machines[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 752~757
赵树森, 陈思嘉, 沈京玲. 用支持向量机识别毒品的太赫兹吸收光谱[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 752~757
- Yao Jianquan, Chi Nan, Yang Pengfei *et al.*. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2213~2233
姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2213~2233
- C. Brückner, B. Pradarutti, R. Müller *et al.*. Design and evaluation of a THz time domain imaging system using standard optical design software[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(27): 4994~5006
- S. Ding, Q. Li, R. Yao *et al.*. Brewster's angle method for absorption coefficient measurement of high-resistivity silicon based on CW THz laser[J]. *Appl. Phys. B.*, 2010, **98**(1): 119~124
- J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons, and drugs[J]. *Semicond. Sci. Tech.*, 2005, **20**(7): S266~S280
- K. Lien Nguyen, Michael L. Johns, Lynn F. Gladden *et al.*. Three-dimensional imaging with a terahertz quantum cascade laser[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2123~2129
- Zhang Zhenwei, Cui Weili, Zhang Yan *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy imaging[J]. *J. Infrared Millim.*

- Waves, 2006, **25**(3): 217~220
张振伟, 崔伟丽, 张 岩 等. 太赫兹成像技术的实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, **25**(3): 217~220
- 11 Barry N. Behnken, Gamani Karunasiri, Danielle R. Chamberlin *et al.*. Real-time imaging using a 2.8 THz quantum cascade laser and uncooled infrared microbolometer camera[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(5): 440~442
- 12 Wai Lam Chan, Matthew L. Moravec, Richard G. Baraniuk *et al.*. Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(9): 974~976
- 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. 2.5 THz 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 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
- 15 Li Qi, Yao Rui, Yin Qiguo *et al.*. Recent advance of CO₂-pumped THz imaging[J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(2): 151~155
李 琦, 姚 睿, 尹奇国 等. CO₂ 激光抽运太赫兹成像研究新进展[J]. 激光技术, 2009, **33**(2): 151~155
- 16 Q. Li, Q. Yin, R. Yao *et al.*. Continuous-wave terahertz scanning image resolution analysis and restoration[J]. *Opt. Eng.*, 2010, **49**(3): 030707
- 17 M. Gu. Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes[M]. Wang Guiying, Chen Zhen, Yang Lisong Transl, Beijing: New Time Press, 2000, 1~9
M. 顾. 共焦显微术的三维成像原理[M]. 王桂英, 陈 侦, 杨莉松译. 北京: 新时代出版社, 2000, 1~9
- 18 M. A. Salhi, M. Koch. Semi-confocal imaging with THz gas laser[C]. *SPIE*, 2006, **6194**: 61940A
- 19 M. A. Salhi, M. Koch. Confocal THz imaging using a gas laser[J]. *Proc. IEEE*, 2008: 133~134
- 20 M. A. Salhi, M. Koch. High resolution imaging using a THz gas laser[C]. EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology, 2008
- 21 M. A. Salhi, I. Pupeza, M. Koch. Confocal THz laser microscopy[J]. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2010, **31**(3): 358~366
- 22 N. N. Zinov'ev, A. V. Andrianov, A. J. Gallant *et al.*. Contrast and resolution enhancement in a confocal terahertz video system[J]. *JETP Letters*, 2008, **88**(8): 492~495
- 23 N. N. Zinov'ev, A. V. Andrianov. Confocal terahertz imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(1): 011114
- 24 M. Lim, J. Kim, Y. Han *et al.*. Perturbation analysis of terahertz confocal microscopy[C]. the 33rd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 16th International Conference on Terahertz Electronics, 2008, IRMMW-THz 2008, 757~758
- 25 张艳东. 连续太赫兹成像技术的检测应用研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008, 26~37
- 26 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulse terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 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