

文章编号: 0253-2239(2010)s100402

# 太赫兹共焦成像的初步研究

丁胜晖 李琦 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** 介绍了共焦扫描显微成像技术的基本原理, 基于 CO<sub>2</sub> 抽运连续太赫兹(THz)激光器 SIFIR-50 搭建了透射型连续 THz 共焦扫描成像系统, 对 THz 共焦扫描成像技术进行了初步的实验研究。实验结果表明将共焦扫描显微成像技术与 THz 成像技术相结合, 能够有效提高 THz 成像系统的横向分辨特性, 显示了 THz 共焦扫描成像技术具有广泛的应用及发展前景。

**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      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS201030.s100402

## Preliminary Study on THz Confocal Imaging

Ding Shenghui Li Qi Yao Rui Wang Qi

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

**Abstract** The principle of confocal scanning microscope is introduced. A THz confocal imaging system is presented based on a CO<sub>2</sub> pumped continuous-wave THz laser SIFIR-50, and preliminary study on THz confocal imaging is carried out. The experimental result shows that the combination of confocal microscope and THz imaging can improve the lateral resolution of THz imaging system effectively, which illustrates the exciting potential applications for this emerging technique.

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

**OCIS codes** 110.6795; 180.1790

## 1 引 言

太赫兹(THz)辐射通常指频率从 0.1~10THz 的电磁波辐射, 在电磁波谱中位于微波和红外辐射之间。该波段的电磁辐射具有许多独特的优点: 如对许多在可见光波段不透明的材料具有穿透特性, 且光子能量低, 不会对生物体产生有害的电离等。因此太赫兹成像技术在危险品检测、医疗和食品检测等领域都具有广阔的应用前景<sup>[1~5]</sup>。目前常见的太赫兹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、显微成像等。由于太赫兹辐射较可见光波波长长, 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。2008 年德国的 Mohammed 和 Martin 借鉴了共焦显微技术的原理并将其应用至

THz 波段, 基于自制 CO<sub>2</sub> 抽运 THz 激光器(波长 118.83 μm)进行了共焦透射扫描成像实验, 有效提高了系统的横向分辨特性<sup>[6~8]</sup>。同年, 英俄两国的研究人员也共同发表了他们对 THz 共焦扫描显微成像技术的实验研究<sup>[9,10]</sup>。THz 共焦扫描显微成像是通过减少视场, 即缩小目标被照明的区域, 与一般的远场 THz 成像方式相比较, 能够有效地提高成像系统的横向及纵向分辨率, 并且具有对物体进行三维层析成像的潜质。

本文介绍了共焦扫描成像的基本原理, 基于 CO<sub>2</sub> 抽运连续 THz 激光器 SIFIR-50 以及热释电探测器 P4-42, 搭建了透射型连续太赫兹共焦扫描成像系统, 并对该系统的横向分辨特性以及共焦

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-06-13

作者简介: 丁胜晖(1978—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹成像技术的研究。E-mail: dingshenghui@gmail.com

导师简介: 李琦(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光主动成像及太赫兹成像技术等方面的研究。

E-mail: hit-liqi@yahoo.com.cn

小孔的作用进行了实验研究。

## 2 共焦扫描成像原理

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。

以透射型共焦扫描方式为例,如图 1 所示;物镜

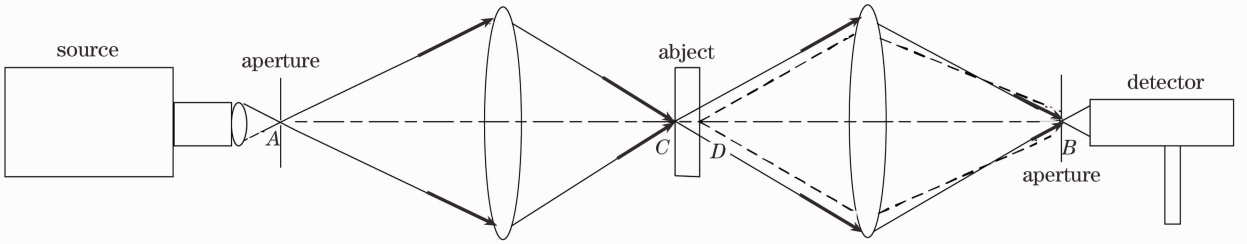


图 1 透射式共焦扫描成像原理

Fig. 1 Principle of confocal scanning imaging in transmission mode

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,系统的点扩散函数为物镜与收集镜的点扩散函数的乘积,即为

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

式中  $M_1$  和  $M_2$  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; $\pm$  则对应反射及透射式的扫描方式。由于系统的点扩散函数为乘积关系,而不是一般串联光学系统的卷积关系,因此总的点扩散特性得到改善,使得系统的分辨率优于一般的显微系统。

## 3 实验装置

基于  $\text{CO}_2$  抽运连续 THz 激光器,搭建了一套透射型 THz 共焦扫描成像装置,实验装置如图 2 所示。THz 源为 Coherent 公司生产的远红外气体激光器 SIFIR-50 FPL,其工作频率选为 2.52 THz(波长 118.83  $\mu\text{m}$ ),平均输出功率为 50 mW。探测器为热释电探测器 P4-42,它具有较宽的频率响应范围(相应波长:0.001~1000  $\mu\text{m}$ ),能够在室温下工作且具有较高的灵敏度,因此保证了实验中即使在光路中加入共焦小孔后仍然能够探测到微弱的 THz 辐射功率,且保持足够的成像对比度。由于热释电探测器只能探测脉冲激光,所以在探测器前方还需加入一个斩波器,斩波频率可以依需要调节,实验

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,由此来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,由此提高了系统的横向分辨率。

中选取斩波频率为 10 Hz。探测器将接收到的 THz 功率转化为电压信号并由电脑采集,以采集到的功率相对值进行成像。 $M_1, M_2, M_3$  依次为焦距分别为 10.16, 15.28 和 5.08 cm 的镀金离轴抛物面镜,聚乙烯薄透镜的焦距均为 12 cm。THz 激光器发出的 THz 激光经  $M_1, M_2$  整形及扩束后被聚乙烯透镜聚焦到样品表面,透过样品的光束被聚乙烯透镜及  $M_3$  收集并聚焦至探测器表面。前后两个共焦小孔的直径分别为 0.7 mm 和 0.6 mm,样品置于二维平移台上,由步进电机控制二维平移台进行  $x$ - $y$  方向的扫描,扫描步长为 0.2 mm。

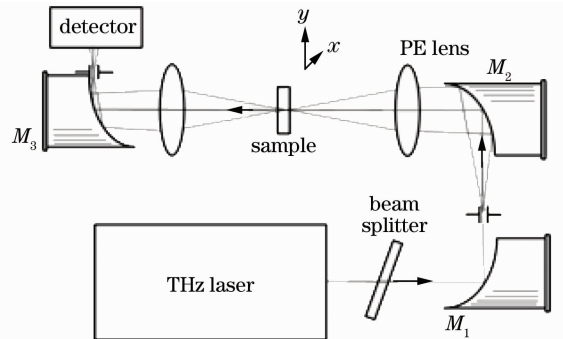


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

## 4 实验结果及讨论

### 4.1 金属板成像结果

首先利用该太赫兹共焦扫描系统对一块金属书

签的局部进行了扫描成像,由于金属能够反射 THz 辐射,因此有金属丝的位置 THz 波的透射率为 0,镂空位置透射率为 1。将采集到的数据转化为 256 灰度级,结果如图 3 所示,其中(a)为实物图,(b)为 THz 成像结果。从图中可看出,即使对样品中较小

的细节也能成像。图中金属丝的最小宽度约为 0.2 mm(斜向),从图中方框部分可见,成像系统对这一细节很好地还原,约占 2 pixel,可见本成像系统具有很高的横向分辨率。

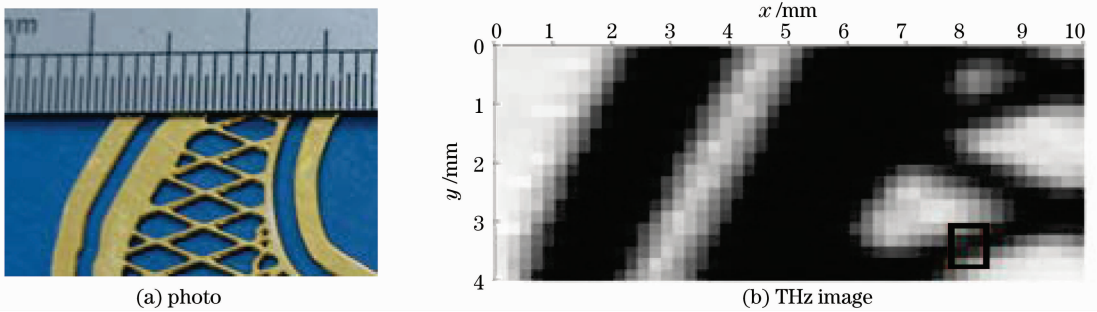


图 3 金属片共焦扫描显微成像结果

Fig. 3 Confocal scanning result of a sheet metal

#### 4.2 X 光底片成像结果

为了检验本套系统成像能力以及加入共焦小孔对成像质量的改进,对印在 X 光底片上的汉字“年”进行了成像实验。同样将采集到的数据转化为 256 灰度级图像,样品实物图以及成像结果如图 4 所示,其中(a)为实物照片,(b)为两共焦小孔加入时的 THz 成像结果,(c)为将两共焦小孔打开后的 THz 成像结果。由于该底片对 THz 波的透过率并不高,

透射率小于 0.3,且明暗处对 THz 波的透射率区别不大,因此系统的对比度有所下降。但共焦小孔的加入使得成像系统仍然能够获得较为清晰的成像结果,将两小孔打开后,扫描结果变为一个十分模糊的图像。为了进一步比较,在图像中分别选取横向以及纵向两线进行线扫描,结果如图 4(d)和(e)所示。可见,共焦小孔的加入明显改善了系统的分辨率以及成像质量。

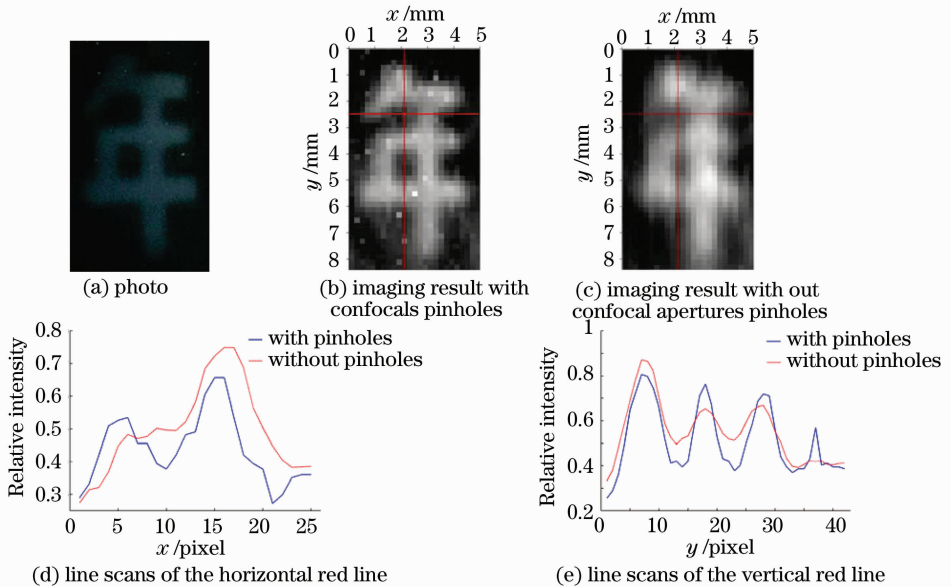


图 4 汉字“年”成像及线扫描结果

Fig. 4 Imagings and line scans result of Chinese character ‘Nian’

## 5 结论

将光学共焦扫描显微的原理应用于 THz 成像技术,可以使成像质量获得较大改进,提高了图像的

对比度以及横向分辨率。基于光抽运 THz 气体激光器及热释电探测器,本文搭建了一个透射型 THz 共焦扫描成像系统,研究了将共焦扫描技术应用于

THz 成像系统后系统横向分辨特性得到改进。对比了共焦小孔的加入前后系统的成像结果,实验结果表明,在光路中加入共焦小孔可以有效地提高成像系统的横向分辨率,提高成像质量,但这一举措将降低探测器接收到的功率,可见 THz 共焦扫描成像技术的发展也亟待 THz 辐射源功率或是探测器灵敏度的提高。为了进一步研究系统的分辨率,需要减少扫描步长,但这将大大增加数据采集所要消耗的时间,需要激光器稳定性及探测器的响应速率的提高。此外,为了进一步的提高系统的成像分辨率,同时尽量保证探测器的接收功率,需要将光路进一步优化以使系统具有足够高的数值孔径。由于透射型共焦系统不具备层析能力,为了实现对物体的三维层析成像,需要改进成像装置,最终实现反射型 THz 共焦扫描成像。作为一项新兴的技术,THz 共焦扫描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

- 1 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
- 2 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
- 3 Zhao Shusen, Chen Sijia, Shen Jingling. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drugs using support vector machines [J]. *Chinese J. Laser*, 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
- 4 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
- 5 Yao Jianquan, Chi Nan, Yang Pengfei *et al.*. Study and Outlook of Terahertz Communication Technology [J]. *Chinese J. Laser*, 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
- 6 M. A. Salhi, M. Koch. Confocal THz imaging using a gas laser [C]. 33rd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 16th International Conference on Terahertz Electronics, 2008, IRMMW-THz **2008**: 133~134
- 7 M. A. Salhi, M. Koch. High resolution imaging using a THz gas laser [C]. EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology, 2008
- 8 M. A. Salhi, I. Pupeza, M. Koch. Confocal THz laser microscopy [J]. *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 2010, **31**(3): 358~366
- 9 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
- 10 N. N. Zinov'ev, A. V. Andrianov. Confocal terahertz imaging [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(1): 011114