

一种有效提高太赫兹时域光谱装置成像空间分辨率的方法

张增艳, 吉 特, 朱智勇, 赵红卫, 陈 敏*, 肖体乔, 郭 智*

中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800

摘 要 太赫兹波成像技术一个最显著的制约因素是其有限的空间分辨率。提出通过在样品前加小孔的方法来提高传统太赫兹时域光谱装置成像的空间分辨率。采用在样品前约 2 mm 处加直径为 0.5 mm 小孔的方法使成像的空间分辨率从 1.276 mm 提高到 0.774 mm, 提高 0.502 mm, 约 39%。通过这个简单的方法在传统的太赫兹时域光谱成像装置上实现了空间分辨率从毫米量级到亚毫米量级的提高。聚乙烯板上直径为 1 mm 的小孔被作为成像的研究对象, 分别采用传统的太赫兹时域光谱装置对样品进行直接成像和在样品前约 2 mm 处加直径为 0.5 mm 的小孔后对样品成像两种方式, 并采用损失成像中信噪比较好的能量损失成像, 对比两种方式得到的样品的太赫兹像, 结果显示聚乙烯板上小孔的边界加小孔后成像比不加小孔直接成像明显清晰。证实了在样品前加小孔可以有效的提高太赫兹成像系统的空间分辨率。从理论上对通过在样品前加小孔提高系统空间分辨率的方法进行了分析, 指出小孔尺寸越小, 系统的空间相干长度越大, 空间分辨率越高, 但同时太赫兹信号的强度会相应减小。该方法可以简单有效的提高太赫兹时域光谱装置成像的空间分辨率, 从而进一步拓展太赫兹谱成像技术的应用领域。

关键词 太赫兹谱; 成像; 空间分辨率; 小孔

中图分类号: O433; O655 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)01-0001-04

引 言

太赫兹 (THz) 辐射是指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波, 其波段介于红外和微波之间。自从 Hu 等^[1]于 1995 年首次利用脉冲 THz 波对树叶成功实现成像以来, THz 波成像技术已经得到了蓬勃发展。从一般的二维成像技术到三维成像技术^[2-4], 从透射式到反射式成像技术^[5,6], 以及连续 THz 波成像技术^[7,8]等方面都有很大的进展。THz 波对很多非极性物质, 如电介质材料及塑料、纸箱、布料等包装材料有很强的穿透力, 并且 THz 波能量很低, 不会对材料产生破坏, 因此 THz 波成像技术在材料、生物医学和食品安全等方面都有着很好的应用前景^[9-11]。随着 THz 波成像技术的不断发展, 将成为科研和生产中一种有效的检测手段和实用工具, 并成为可见光成像与 X 射线成像的有力补充。

THz 波成像技术一个最显著的制约因素是其有限的空间分辨率。为了解决这个问题, 有人提出了近场成像的方法^[12-15]。如果入射源的尺寸比波长小, 入射源与样品的距离又很近, 这样就可能实现亚波长量级的分辨率。比较典型的

是带着动态孔径的近场成像技术^[12], 但是这种技术需要在光路上加一路控制光, 控制经聚焦在导体表面激发产生的载流子, 相对传统的太赫兹时域光谱装置改动较大, 而且因为涉及到的物理量很多, 通过透射(或反射)信息来解析出样品的物理参数也很复杂。

采用在样品前加小孔的方法使传统的太赫兹时域光谱装置成像的空间分辨率有了明显提升, 从毫米量级提高到了亚毫米量级。对直径为 1 mm 的小孔进行 THz 成像研究, 发现加小孔后样品成像边界比不加小孔直接成像边界明显清晰。

1 实验部分

1.1 装置及条件

实验装置如图 1, 主要设备有美国光谱物理公司制造的 Mai Tai 飞秒激光器, 美国 Zomega 公司研制的 THz 系统。飞秒激光器的平均功率大于 700 mW, 脉宽小于 100 fs。激光脉冲被分为两路, 一路作为泵浦光, 激发大孔径 GaAs 光电导天线产生 THz 脉冲; 另一路作为探测光, 利用光电采样原理探测 THz 波的电场强度, 探测元件为 ZnTe 晶体。通过扫

收稿日期: 2013-12-04, 修订日期: 2014-03-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB632901)资助

作者简介: 张增艳, 1980 年生, 中国科学院上海应用物理研究所博士研究生 e-mail: zyzhang@sinap.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: chenmin@sinap.ac.cn; guozhi@sinap.ac.cn

探测激光脉冲和 THz 脉冲的相对时间延迟, 即可得到 THz 脉冲随时间变化的电场波形。太赫兹系统频率分辨率小于 0.01 THz, 信噪比大于 1 000。整个太赫兹光学系统在一个密闭的盒子中, 分别使用不加小孔和在样品前约 2 mm 处(见图 1)加小孔后两种方式, 在常温下(294.5~295.5 K)进行实验。

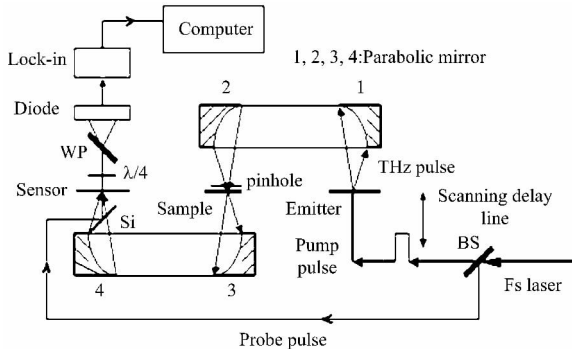


Fig 1 Terahertz time-domain spectroscopy system

1.2 数据处理方法

测量太赫兹时域光谱装置成像的空间分辨率时, 首先移动扫描延迟线到信号的峰值位置, 把一个刀片放在 THz 光的聚焦点处, 然后再沿着刀片刃口的垂直方向扫描, 扫描过程中保证时间轴(即扫描延迟线)不动, 会得到一个信号曲线。按照在最大信号 10%~90%处工作台移动的距离, 可以测量出系统的极限空间分辨率。首先直接测量了这套装置的空间分辨率, 然后在样品前约 2 mm 处加直径为 0.5 mm 的小孔后又重新测量了这套装置的空间分辨率。

将待测样品放于可在 X-Y 平面做二维移动的样品架上, 在垂直于 THz 波入射的平面内做二维逐点扫描。通过设置一定的时间延迟范围和对样品上不同点的扫描, 能够在 X-Y 平面上获得样品上每一空间点上带有样品信息的透射时域谱(如图 2)。对每一点的太赫兹时域谱与未通过样品的太赫兹时域谱相对比, 对这些数据进行不同的处理就可以得到样品的 THz 图像。本实验采用 THz 波通过样品后的能量损失成像, 表达式为

$$I_{\text{pixel}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |E_{\text{ref}}(t)|^2 dt - \int_{t_1}^{t_2} |E_{\text{pixel}}(t)|^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} |E_{\text{ref}}(t)|^2 dt} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{ref}}(t)$ 和 $E_{\text{pixel}}(t)$ 分别为参考点(选用通过空气的信号)和每个样品点 THz 时域上的信号值, 其平方值对整个延迟时间做积分, 进行如公式(1)的处理可以得到 THz 波通过每个样品点后的相对能量损失 I_{pixel} 。通过这种成像方法对应于吸收、折射、散射和离散而引起的 THz 相对能量的损失在图像上得到了重现, 是一个综合效果的体现。这种方法在损失成像中具有较好的信噪比, 可有效消除离散效应。

选取的样品是 2 mm 厚的高密度聚乙烯板, 板中间有一直径 1 mm 的圆孔。成像时(包括加小孔成像)X 和 Y 轴设置移动步长均为 0.2 mm, 不加小孔直接成像时 X 轴和 Y 轴移动范围均为 7.6 mm。加小孔后成像时 X 轴移动范围为 8.6

mm, Y 轴移动范围为 7.6 mm。分别采用对样品进行直接成像和在样品前约 2 mm 处加直径为 0.5 mm 的小孔后成像两种方式, 对直径为 1 mm 的小孔进行了 THz 成像研究。

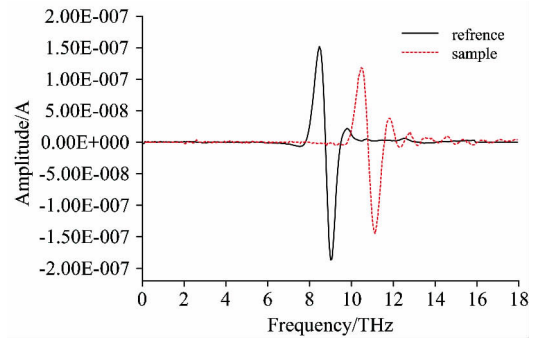


Fig 2 Terahertz time domain spectrum

2 结果与讨论

首先测量了这套装置的空间分辨率, 如图 3(a)所示, 从信号为最大信号幅值的 90%处 X 轴的位置到信号为最大幅值的 10%处 X 轴的位置, 工作台移动的距离为 1.276 mm,

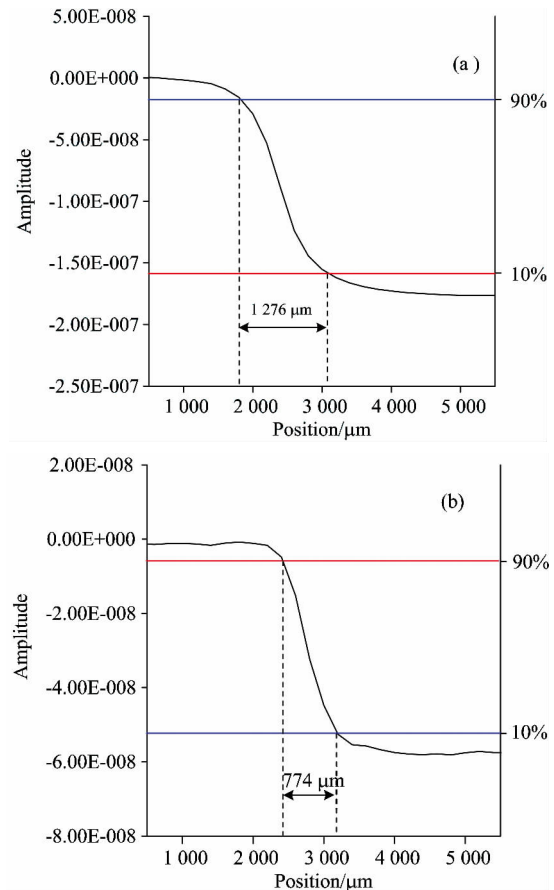


Fig 3 Measured spatial resolution curves of the terahertz time-domain spectroscopy

(a) without pinhole, the spatial resolution is measured to be 1.276 mm; (b) a pinhole of 0.5 mm diameter is inserted 2 mm in front of the sample, the spatial resolution is measured to be 0.774 mm

该数值为本系统的极限空间分辨率。图 3(b)为加小孔后的结果,可以看出从信号为最大信号幅值的 90%到信号为最大信号幅值的 10%之间工作台移动的距离为 0.774 mm,因此得到加小孔后系统的空间分辨率为 0.774 mm,较之前提高了 0.502 mm,约 39%,使系统的空间分辨率从毫米量级提高到了亚毫米量级。

从图 1 太赫兹时域光谱装置示意图上可以看出,理论上样品是放在太赫兹波的聚焦点处,此时得到的空间分辨率最好,但实际上样品和聚焦点一般不能很好的重合,此时在样品前约 2 mm 处加小孔,小孔可以看成次级光源点,根据公式

$$L = \frac{0.61R\lambda}{\sigma} \quad (2)$$

空间相干长度 L 和光源点到样品的距离 R , 波长 λ 成正比,和次级光源点尺寸 σ 成反比。式(2)中太赫兹波段可认为波长为 0.3 mm(1 THz 处),小孔在样品前约 2 mm 处,可以认为光源点到样品的距离为 2 mm,次级光源点尺寸即小孔直径为 0.5 mm,代入式(2)可得到加小孔后系统的空间相干长度 $L=0.732$ mm。小孔尺寸越小,空间相干长度越大,空间分辨率越高。但是由于小孔的存在,太赫兹波的信号强度也会相应减小。

用这套太赫兹时域光谱装置观察了厚度为 2 mm 的聚乙烯板上直径为 1 mm 的小孔的成像,在样品前不加小孔直接成像得到的太赫兹能量损失像如图 4(a)所示,在样品前约 2 mm 处加直径为 0.5 mm 的小孔后所得到的太赫兹能量损失像如图 4(b)所示。为了在样品前约 2 mm 处放置小孔,两次样品位置稍有移动。比较图 4(a)和图 4(b)可以看出在加了小孔之后对 1 mm 小孔所成像的边界比不加小孔时明显清晰

很多,这也进一步验证了在样品前约 2 mm 处加小孔可以有效提高太赫兹时域光谱装置成像的空间分辨率。

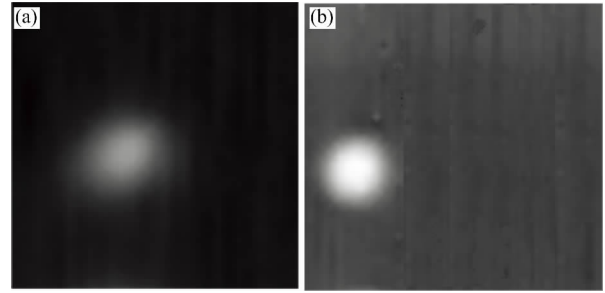


Fig 4 Terahertz images of a hole of 1 mm diameter

(a) without pinhole in front of the sample; (b) a pinhole with diameter 0.5 mm was inserted 2 mm in front of the sample.

3 结 论

采用在样品前加小孔的方法使传统的太赫兹时域光谱装置成像的空间分辨率有了明显提升,测量结果表明系统的空间分辨率较之前提高了 0.502 mm,约 39%,从毫米量级提高到了亚毫米量级,理论上对这种空间分辨率的改善进行了分析。分别采用对样品进行直接成像和在样品前加小孔后成像两种方式对直径为 1 mm 的小孔进行了 THz 成像研究,发现加小孔后样品成像边界比之前明显清晰。进一步验证了该方法可以简单有效的提高太赫兹时域光谱装置成像的空间分辨率,从而进一步拓展太赫兹谱成像技术的应用领域。

References

- [1] Hu B B, Nuss M C. *Opt. Lett.*, 1995, 20(16): 1716.
- [2] Beard M C, Turner G M, Schmuttenmaer C A. *Phys. Med. Biol.*, 2002, 47: 3841.
- [3] Roth D J, Reyes-Rodriguez S, Zimdars D A, et al. *AIP Conf. Proc.*, 2012, 1430: 566.
- [4] Paul Dean, Alex Valavanis, James Keeley, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103: 181112.
- [5] Wang S, Zhang X C. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2004, 37: R1.
- [6] Jelena Obradovic, James H P Collins, Ole Hirsch, et al. *Polymer*, 2007, 48: 3494.
- [7] Karpowicz N, Zhong H, Xu J Z, et al. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, 20: S293.
- [8] Sun Wenfeng, Wang Xinke, Zhang Yan. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(22): 5533.
- [9] Paul M J, Tomaino J L, Kevek J W, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101: 091109.
- [10] Leila H Eadie, Caroline B Reid, Anthony J Fitzgerald, et al. *Expert Systems with Applications* 2013, 40: 2043.
- [11] Ashish Y Pawar, Deepak D Sonawane, Kiran B Erande, et al. *Drug Invention Today*, 2013, 5(2): 157.
- [12] Chen Q, Jiang Z P, Xu G X, et al. *Opt. Lett.*, 2000, 25(15): 1122.
- [13] Wang Xinke, Cui Ye, Hu Dan, et al. *Optics Communications*, 2009, 282(24): 4683.
- [14] Moon Kiwon, Do Youngwoong, Lim Meehyun, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101: 011109.
- [15] Liu Jingbo, Rajind Mendis, Daniel M Mittleman, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100: 031101.

An Effective Method for Improving the Imaging Spatial Resolution of Terahertz Time Domain Spectroscopy System

ZHANG Zeng-yan, JI Te, ZHU Zhi-yong, ZHAO Hong-wei, CHEN Min*, XIAO Ti-qiao, GUO Zhi*
Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Terahertz radiation is an electromagnetic radiation in the range between millimeter waves and far infrared. Due to its low energy and non-ionizing characters, THz pulse imaging emerges as a novel tool in many fields, such as material, chemical, biological medicine, and food safety. Limited spatial resolution is a significant restricting factor of terahertz imaging technology. Near field imaging method was proposed to improve the spatial resolution of terahertz system. Submillimeter scale's spatial resolution can be achieved if the income source size is smaller than the wavelength of the incoming source and the source is very close to the sample. But many changes were needed to the traditional terahertz time domain spectroscopy system, and it's very complex to analyze sample's physical parameters through the terahertz signal. A method of inserting a pinhole upstream to the sample was first proposed in this article to improve the spatial resolution of traditional terahertz time domain spectroscopy system. The measured spatial resolution of terahertz time domain spectroscopy system by knife edge method can achieve spatial resolution curves. The moving stage distance between 10% and 90% of the maximum signals respectively was defined as the spatial resolution of the system. Imaging spatial resolution of traditional terahertz time domain spectroscopy system was improved dramatically after inserted a pinhole with diameter 0.5 mm, 2 mm upstream to the sample. Experimental results show that the spatial resolution has been improved from 1.276 mm to 0.774 mm, with the increment about 39%. Though this simple method, the spatial resolution of traditional terahertz time domain spectroscopy system was increased from millimeter scale to submillimeter scale. A pinhole with diameter 1 mm on a polyethylene plate was taken as sample to terahertz imaging study. The traditional terahertz time domain spectroscopy system and pinhole inserted terahertz time domain spectroscopy system were applied in the imaging experiment respectively. The relative THz-power loss imaging of samples were use in this article. This method generally delivers the best signal to noise ratio in loss images, dispersion effects are cancelled. Terahertz imaging results show that the sample's boundary was more distinct after inserting the pinhole in front of sample. The results also conform that inserting pinhole in front of sample can improve the imaging spatial resolution effectively. The theoretical analyses of the method which improve the spatial resolution by inserting a pinhole in front of sample were given in this article. The analyses also indicate that the smaller the pinhole size, the longer spatial coherence length of the system, the better spatial resolution of the system. At the same time the terahertz signal will be reduced accordingly. All the experimental results and theoretical analyses indicate that the method of inserting a pinhole in front of sample can improve the spatial resolution of traditional terahertz time domain spectroscopy system effectively, and it will further expand the application of terahertz imaging technology.

Keywords Terahertz spectroscopy; Imaging; Spatial resolution; Pinhole

(Received Dec. 4, 2013; accepted Mar. 21, 2014)

* Corresponding authors