

# 太赫兹成像技术在无损检测中的实验研究

邸志刚<sup>1,2</sup>, 姚建铨<sup>1</sup>, 贾春荣<sup>2</sup>, 邢丕彬<sup>1</sup>, 杨鹏飞<sup>1</sup>, 徐小燕<sup>1</sup>

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息科学与技术重点实验室, 天津大学, 天津 300072;

2. 河北联合大学电气工程学院, 河北 唐山 063009)

**摘要:**太赫兹成像是一种新兴技术,为了将其应用在无损检测领域,提出了一种基于连续扫描的新型太赫兹成像系统。通过对隐藏的硬币和带小孔的金属板等样品进行检测,得到了清晰的图像。实验结果表明通过本成像系统可以对隐藏的金属样品进行鉴别,其空间分辨率低于0.5 mm。因而本系统可以成功地应用于无损检测。

**关键词:**激光光学;太赫兹;太赫兹成像;无损检测;空间分辨率

**中图分类号:**TN29 **文献标识码:**B **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.10.022

## Experimental study on terahertz imaging technique in nondestructive inspection

DI Zhi-gang<sup>1,2</sup>, YAO Jian-quan<sup>1</sup>, JIA Chun-rong<sup>2</sup>, BING Pi-bin<sup>1</sup>, YANG Peng-fei<sup>1</sup>, XU Xiao-yan<sup>1</sup>

(1. College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Institute of Laser and Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. College of Electrical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

**Abstract:** Terahertz imaging is a technique which is under fast developing. In order to utilize it in nondestructive inspection, a novel THz imaging system, which based on continuous scanning system, is proposed. By experiment, the distinct images of different samples such as concealed coin or metal platelet with small holes are acquired. The result indicates that suspicious metal objects can be identified easily by this system. More important, the spatial resolution of this system is better than 0.5 mm. So we can draw a conclusion that THz imaging can be applied in nondestructive inspection successfully.

**Key words:** laser optics; THz; THz imaging; nondestructive inspection; spatial resolution

### 1 引言

太赫兹波通常指的是频率在0.1~10 THz的电磁波,它在频谱中所处的位置如图1所示。

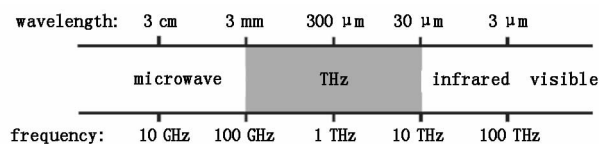


图1 太赫兹波在频谱中的位置

介于电子和光电子之间的太赫兹科学与技术已经引起了科研界很大的兴趣。其原因不是因为它广泛存在及处于未被探索的领域,而是因为它的一些独特优点,例如透视性、瞬态性、宽带性及低能性,尤其是它的低能性。太赫兹光子能量只有毫电子伏

特,相对于X射线而言它不会由于电离而破坏被检测的样品。太赫兹波与可见光、X光及超声波一样,可以作为光源对样品进行成像。此外,现在的太赫兹成像已经成为X光成像、毫米波成像及超声波成像的重要补充。由于太赫兹的独特优点,太赫兹成像系统具有如下主要优点:①对非金属材料有很强的穿透力,其衰减系数比超声波低2~3个数量级;②非接触检测,省去了相互接触从而避免污染及与

**基金项目:**国家“973”计划项目(No. 2007CB310403)资助。

**作者简介:**邸志刚(1975-),男,在读博士,讲师,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: dzg0512@sohu.com

**收稿日期:**2011-02-27

样品发生反应;③高效检测,容易实现实时监测;④输出信号是电信号,避免了光电转换,从而简化了传感器与处理器的界面;⑤对雾、灰尘、水蒸汽、化学气体和高低温具有很强的穿透和抗干扰能力。所以,太赫兹成像技术引起了越来越多的科学家的关注。但是现有的太赫兹实时成像系统具有很多技术难题,比如成像面积小、结构复杂及设备昂贵。为了解决这些问题,设计了一种基于连续扫描的新型太赫兹透射成像系统,并将其成功应用于样品检测。

## 2 太赫兹成像

太赫兹成像技术独特的优点就是包含丰富的信息,每幅像源与太赫兹时域光谱对应。自从1995年,Hu和Nuss建立第一个成像系统以来<sup>[1]</sup>,越来越多的科学家开始研究太赫兹成像<sup>[2-3]</sup>,太赫兹扫描对IC<sup>[4]</sup>也成功成像。

太赫兹成像原理如下:已知波形的太赫兹波作为光源照射到样品的表面,通过样品后的透射谱或反射谱包含的振幅信息及相位信息将会携带样品的复介电常数信息。然后通过成像系统对探测器探测到的振幅信息及相位信息进行分析处理,从而得到样品的图像。

太赫兹成像系统由飞秒激光源、光学延迟台、信号获取及数据处理系统组成。太赫兹成像技术根据太赫兹源可以分为脉冲成像及连续成像,前者可以得到大量的信息,但是辐射功率低、成像慢,数据处理很复杂;而后者具有结构简单、辐射功率高、成像速度快等优点。因此,试验中采用基于太赫兹连续成像技术。

## 3 实验方案

设计的实验方案是记录透射光振幅从而对样品成像,透射成像示意图如图2所示。

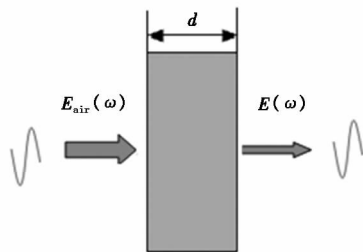


图2 透射成像示意图

$E_{\text{air}}(\omega)$  是入射太赫兹波,  $E(\omega)$  是通过样品后的透射太赫兹波。根据菲涅耳原理,当太赫兹与样品相互作用后代表振幅变化的透射系数  $t$  可由式(1)获得<sup>[5-6]</sup>:

$$t = \frac{2n_1 \cos\theta_i}{n_1 \cos\theta_i + n_2 \cos\theta_t} \quad (1)$$

式中,  $n_1, n_2$  是空气和样品的折射率;  $\theta_i$  和  $\theta_t$  是入射角和折射角。当太赫兹垂直照射样品时,  $\theta_i = \theta_t = 0$ , 所以:

$$t = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (2)$$

当太赫兹透过厚度为  $d$  的样品时,其相位将发生相应变化,相位变化由传输因子决定:

$$P(\omega, t) = \exp\left(\frac{-i\tilde{n}(\omega)\omega d}{c}\right) \quad (3)$$

没有样品时,太赫兹在空气中传输:

$$E_{\text{air}} = E_0(\omega) P_{\text{air}}(\omega, z) \quad (4)$$

当太赫兹通过厚度为  $d$  的样品时:

$$E(\omega) = E_0(\omega) P_{\text{air}}(\omega, (z, d) t_{01} P_{\text{sample}}(\omega, d) t_{10}) \quad (5)$$

式中,  $E_0$  是太赫兹波到达样品表面时的电场功率;  $t_{01}$  是空气到样品的透射系数;  $t_{10}$  是样品到空气的透射系数;  $P_{\text{sample}}$  是太赫兹透过样品后的相位变化量。因此,太赫兹透射成像的传输函数可以表示为:

$$T = \frac{E(\omega)}{E_{\text{air}}(\omega)} \quad (6)$$

现有的太赫兹实时成像系统具有很多技术难题,比如成像面积小、结构复杂及设备昂贵。为了解决这些问题,设计了一种基于连续扫描的新型太赫兹透射成像系统,其原理示意图如图3所示。

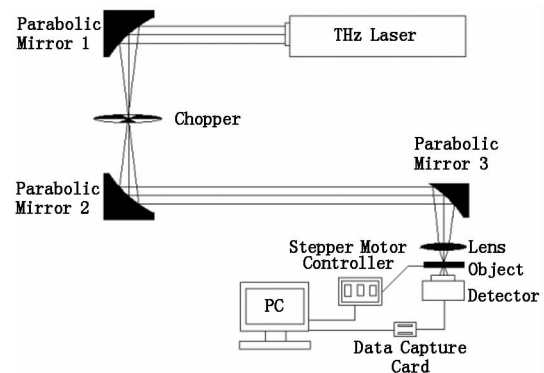


图3 新型太赫兹透射扫描成像系统示意图

此系统由  $\text{CO}_2$  泵浦的太赫兹激光源、斩波器、离轴抛物面镜、样品台、聚乙烯透镜、探测器、二维移动平台、控制系统及计算机构成。

$\text{CO}_2$  泵浦的太赫兹激光源 F1RL-100 从爱丁堡购得,用基于  $\text{LiTaO}_3$  的热释电探测器探测调制的太赫兹波。实物图如图4所示。

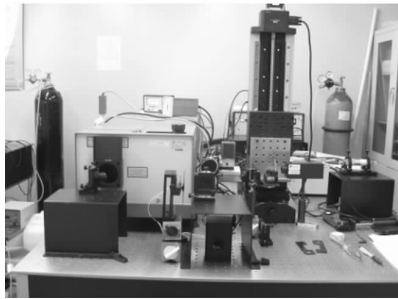
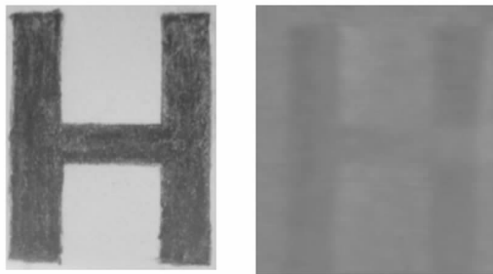


图4 太赫兹透射扫描成像系统实物图

系统中太赫兹被离轴抛物镜聚焦在斩波器上被调制,然后再被另外一组抛物镜及聚乙烯透镜聚焦在样品表面。透射太赫兹波照射到探测器上,其强度由数据采集卡收集并且转为数字信号输入到计算机中,然后经过数据处理即可得到二维太赫兹透射图像。

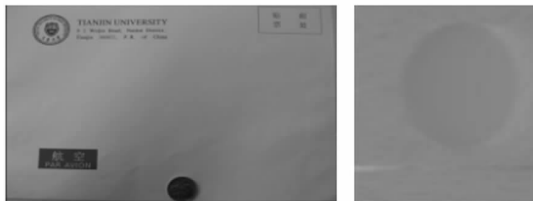
4 实验结果分析

试验中,太赫兹频率 2.52 THz,输出功率 120 mW,空间分辨率约 0.4 mm,二维移动平台的移动范围及步长由计算机根据实际需要进行控制。通过对白纸上的铅笔字、隐藏在信封中的硬币、带孔的金属小板进行检测,可以得到清晰地太赫兹图像,如图 5 ~ 图 7 所示。



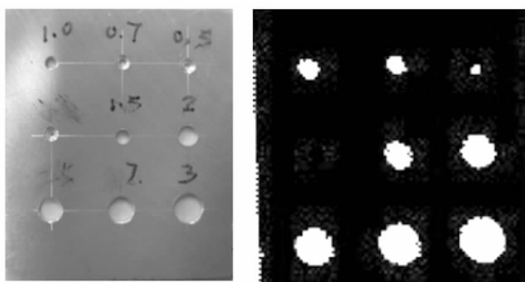
(a) 照片 (b) 太赫兹像

图5 白纸上铅笔字成像



(a) 照片 (b) 太赫兹像

图6 信封中硬币成像

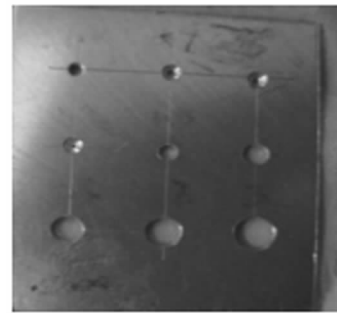


(a) 照片 (b) 太赫兹像

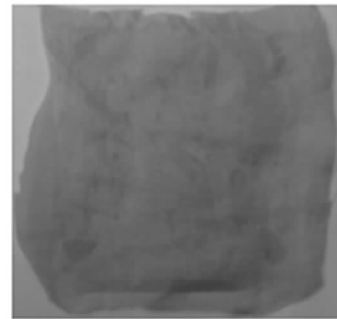
图7 带小孔金属板成像

因为太赫兹波对金属有很高的反射率,图 7 表明此系统可以对 0.5 mm 的孔成像,尽管不太清楚,但是能够分辨出来。而对于 0.2 mm 的孔则不能成像。所以我们可以得出结论,此系统的空间分辨率小于 0.5 mm,但大于 0.2 mm。

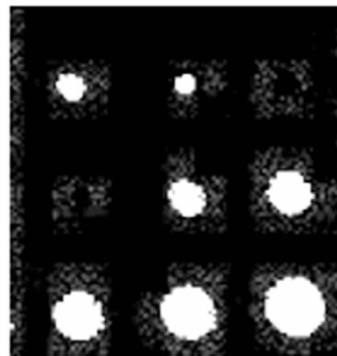
除了上述实验以外,还对隐藏在布料下面的带小孔金属板成像,其结果如图 8 所示。



(a) 照片



(b) 隐藏在布料下的照片



(c) 隐藏在布料下太赫兹图像

图8 带孔金属板

图 8(b)中我们不能看到金属板,通过设计的新型太赫兹成像系统可以看到其太赫兹图像如图 8 (c)所示。但是这幅图只能分辨 0.7 mm 的孔。这是因为覆盖在金属板上的布料很松弛,对太赫兹波有散射效应,从而影响了系统的空间分辨率。然而由此我们可以得出结论太赫兹成像系统可以应用在安检领域探测隐藏在衣服下的金属武器。

目前连续太赫兹成像技术已经逐渐发展成熟,

但是所成图像的质量并不高。所以如何提高成像质量已经被广泛关注。通过一系列的实验,课题组总结了一下六条关键的影响因素:

(1)光斑尺寸。太赫兹成像系统的分辨率主要由样品上光斑尺寸所决定,实验表明减小样品上光斑尺寸可以提高系统的分辨率。

(2)太赫兹强度。其强度将会影响图像的对比度。

(3)太赫兹频率。这是光斑尺寸的决定性因素,它不仅影响系统的对比度,而且决定着空间分辨率。

(4)移动平台的步长。在一定程度上它可以决定图像的分辨率,并且分辨率与步长在同一数量级。

(5)斩波器频率。它可以影响太赫兹探测器的灵敏度,在一定范围内,频率越低,响应度越好。

(6)图像处理。可以降低系统噪声,增加对比度,进而得到高质量的太赫兹图像。

## 5 结论

通过实验,我们得到了隐藏样品的清晰太赫兹图像,并且其空间分辨率低于0.5 mm。因此说,此系统可以应用到无损检测领域,并且具有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] B B Hu, M C Nuss. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716 - 1718.
- [2] Yang Jun, Ruan Shuangshen, Zhang Min, et al. Experimental research on real-time continuous-wave terahertz imaging for mail inspection application [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2008, 25(3): 261 - 264. (in Chinese)  
杨珺, 阮双琛, 张敏, 等. 实时连续波太赫兹成像在邮件检测中的应用[J]. 深圳大学学报理工版, 2008, 25(3): 261 - 264.
- [3] Q Li, R Yao, Q G Yin, et al. 2. 52-THz Scanning reflection imaging and image preprocessing [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7277: 72770J - 1 - 72770J - 6.
- [4] Toshihiko Kiwa, Masayoshi Tonouchi. Laser terahertz-emission microscope for inspecting electrical faults in integrated circuits [J]. Optics Letters, 2003, 28(21): 2058 - 2060.
- [5] Yao Qijun. Optics course (2<sup>nd</sup> edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 43 - 46.
- [6] Li Fuli. Altitude laser physics (2<sup>nd</sup> edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 525 - 530.