

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 01 - 0015 - 04

# 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用

葛新浩, 吕默, 钟华, 张存林

(首都师范大学物理系 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室  
太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 实现了基于返波管源的太赫兹波反射式成像系统. 这是一种新型的无损探伤成像方式. 从样品表面或者基底反射回来的太赫兹波被焦热电探测器收集, 最后经过计算机处理成像. 频率为 0.7 THz 的成像系统被用来对一系列样品进行无损检测, 如硬币、徽章、模型飞机以及预埋了人工缺陷的工业样品. 结果表明, 很多工业材料相对于太赫兹波都是透明的, 尤其是一些在航空航天技术中具有广泛应用价值的吸收微波的材料.

**关键词:** 无损检测; 太赫兹成像; 返波振荡器; 反射式成像

**中图分类号:** O439 **文献标识码:** A

## TERAHERTZ WAVE REFLECTION IMAGING SYSTEM BASED ON BACKWARD WAVE OSCILLATOR AND ITS APPLICATION

GE Xin-Hao, LV Mo, ZHONG Hua, ZHANG Cun-Lin

(Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics,  
Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** A terahertz (THz) wave reflection imaging system based on backward wave oscillator (BWO) was presented. It is a new approach to non-destructive testing. The intensity information of the terahertz wave after being reflected from the sample surface or substrate was collected by a pyroelectric detector, and then imaged by computer. A number of samples which had potential imaging applications were tested by using 0.7 THz radiation, including coins, badges, a model airplane and some industrial samples that contained pre-built defects. The experimental results reveal that THz radiation is highly transparent to many industrial materials, especially the "microwave-absorbing" material which is widely used in aero and space technologies.

**Key words:** nondestructive testing; terahertz imaging; backward-wave oscillator (BWO); reflection imaging

### 引言

太赫兹辐射 (THz,  $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ ) 泛指辐射频率在 0.1 ~ 10 THz 内的电磁波辐射. 这个频段内的辐射具有良好的穿透性, 可以穿透皮革、塑料、木头、纸张等日常物体, 对生物体不具有破坏性<sup>[1]</sup>, 越来越多地被应用在实际生活中. 返波振荡器 (返波管, BWO, Backward Wave Oscillator) 太赫兹源就是其中的一种连续波太赫兹辐射源, 它是利用电子束与梳形减速结构相互作用产生返波振荡的微波电子管, 目前只有返波振荡器和自由电子激光器在 0.1 THz

以上具有宽带调谐和大功率输出的能力<sup>[1]</sup>.

最近几年, 连续波太赫兹成像以其高功率、易于操作调节的特性在一些无损探伤的领域逐渐取代了脉冲式太赫兹时域光谱成像装置. 返波管 (BWO) 作为太赫兹辐射源, 具有独特的优势, 如输出功率高、波前性质良好、稳定性好, 而且体积小、操作简便、光路组成较为简单等.

我们的工作主要是利用返波管产生的太赫兹辐射对样品进行反射式成像研究. 大多数金属, 太赫兹波都不能透射, 这就导致透射式光路存在一定的局限性<sup>[2]</sup>. 而根据太赫兹辐射对于绝大多数不导电材

收稿日期: 2009 - 01 - 02, 修回日期: 2009 - 06 - 18

Received date: 2009 - 01 - 02, revised date: 2009 - 06 - 18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 "973 计划" (2007CB310408); 国家自然科学基金 (10390160)

作者简介: 葛新浩 (1983-), 男, 北京房山人, 硕士研究生, 主要从事太赫兹连续波成像研究, E-mail: loringe@126.com.

料的高透过性和对金属及一些导电介质的高反射性的特性<sup>[3]</sup>,我们搭建了这个反射式成像系统,通过记录从样品表面或者其基底表面反射回的太赫兹波对样品进行成像.本实验所涉及的样品中很大一部分是在航空工业上具有重要意义的工业材料,比如碳纤维和微波波段的吸波涂层材料.

## 1 基本原理及反射成像原理简介

### 1.1 返波振荡器基本原理<sup>[4]</sup>

BWO内部存在着强磁场、热阴极、阳极、梳形减速结构以及耦合波导.首先,电子由热阴极发射出来,在强磁场的作用下受洛伦兹力作用而聚焦,聚焦后的电子经过梳形减速结构后速度下降,最后到达阳极.电子速度的改变会辐射出电磁波,其方向与电子运动方向相反.电磁波与波导耦合,从而输出到自由空间.输出频率取决于电子的速度,范围在50~1500GHz内,而电子的速度由加载在电极间的电压决定.

### 1.2 反射成像原理<sup>[5]</sup>

当太赫兹波入射到金属表面的时候会被直接反射,入射到附着着非金属表面的物体时会出现两种情况:一部分电磁波被物体表面反射,另一部分穿透物体,从底板处反射.由于物体各部分对太赫兹的反射率,物体各部分的厚度以及底板的反射有所不同,导致反射回的太赫兹波的强度发生变化.通过记录这种变化,可以得到关于物体形状、大小、空间分布甚至组成材料的相关信息.相对于传统的透射式系统,反射式成像系统搭建的难度更大,主要原因有两点:第一,太赫兹光不可见,反射光束相对于入射光束方向改变,因此收集起来容易受到物体表面朝向、元件空间分布等多种因素影响;第二,反射光谱的组成可分为镜面反射光、漫反射光、散射光等,物体粗糙程度、光斑大小、信号噪声比等因素都会对反射光谱中各部分的组成和数据处理方式有所影响.但是反射式成像系统远比透射式具有更广阔的实际应用价值,因为在很多实际情况中,目标物体往往体积较大,并对太赫兹具有强烈的吸收——比如绑缚在恐怖分子身上的爆炸物品,或者附着在金属等对太赫兹射线不透明的底板上——比如覆盖在航天飞机燃料箱外层的隔热泡沫材料.在这些情况下,反射式成像系统取代透射式系统成为唯一可行的探测手段.

反射式系统的反演方法按照不同的成像方法有很多种,在全息成像中一般是通过重构反射波来实现的.在脉冲式太赫兹成像系统中,脉冲的峰值、中心频率的读数或者反射脉冲与参考脉冲的相关系

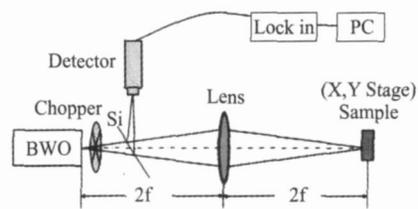


图1 反射式成像系统 BWO成像系统的结构示意图

Fig 1 Schematic layout of the reflective BWO THz imaging setup

数等,都曾被用来进行反演成像<sup>[1]</sup>.返波管振荡器产生的太赫兹信号是单频的,而且探测端只能够测量出信号的能量,因此本试验采取了最直接的点对点的扫描成像方式,图像上每个点反射的信号能量作为反演的唯一依据.

## 2 基于返波振荡器的反射式成像系统介绍

反射式 BWO成像系统<sup>[6]</sup>的结构示意图如图1所示,本系统采用550~710GHz返波振荡器源,它的辐射功率为0.2mW.探测器使用焦热电探测器<sup>[7]</sup>(Pyroelectric Detector).本系统采用单频成像,所以在系统使用过程中固定使用700GHz频率为成像频率.当光束从返波振荡器出射,先经频率为10Hz的斩波器调制,然后通过硅片,被焦距为20cm、直径为30cm的聚乙烯透镜聚焦到样品上.样品被固定在二维平移台上,通过移动样品对其进行扫描成像.正入射到样品的光束经样品表面反射后再次由聚乙烯透镜聚焦,聚焦的光束由硅片再次进行反射,最后进入焦热电探测器内,将光强信号转变为电压信号.电压信号与斩波器调制频率同时输入锁相放大器,将交流信号变为直流信号,最后通过数据采集单元由计算机程序采集并通过成像算法进行成像.图2为系统光路和软件界面的实物照片,其中(a)、(b)、(c)为不同角度的实际光路,(d)为自主开发的软件界面图.由于返波管太赫兹源具有非常好的稳定性,此成像系统具有操作简便、便于集成的特点,适用于在更加苛刻的外部环境下操作.本实验在普通温度及湿度条件下成像效果良好,相对于传统TDS系统恒温恒湿条件具有很大的改善,更贴近实际应用的环境条件.

系统采用逐点扫描方式进行成像,扫描范围为10cm×10cm的区域,以1mm为步长,成像时间为30min左右.目前市场上连续波振荡器的输出功率基本上是随着频率的降低而增大的<sup>[8]</sup>,这就需要在高频与高能量间做出选择.为了得到较高的空间分辨率,成像频率设置在700GHz我们采用小孔

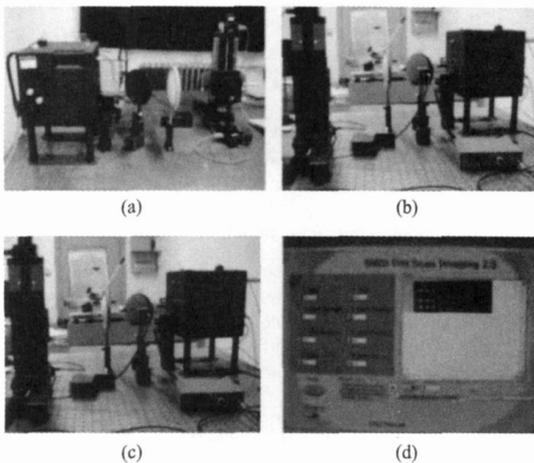


图2 系统光路和软件界面的实物照片 (a)(b)(c)为不同角度的实物光路照片 (d)为软件界面照片

Fig.2 Photo pictures of the setup and software interface (a) (b)(c) photos of the setup (d) photo of the software interface

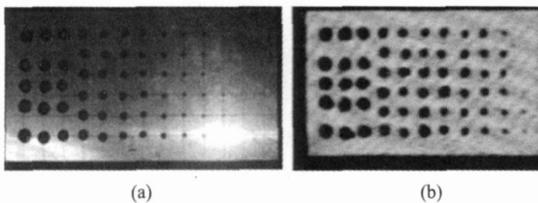


图3 打了小孔的铝板的成像结果 (a)为实物照片 (b)为系统成像的结果,样品尺寸为 140mm × 85mm

Fig.3 The images of an aluminum board with holes (a) photo picture of the sample (b) THz image of the sample. The size of the sample is 140mm × 85mm

扫描的方法测定了系统能量半高的直径大小为 4.3mm, 700GHz 高斯光束能量半高的直径在衍射极限条件下可计算得 0.19mm. 这说明本系统还有进一步优化可能, 采用抛面镜或者双曲面镜<sup>[9]</sup>可以将焦斑进一步缩小, 从而提高系统的空间分辨率<sup>[10]</sup>. 但是由于返波振荡器出射光束为近高斯分布<sup>[4]</sup>, 所以此系统不能达到理论值, 并且主要由于硬件的限制只能得到 4.3mm.

### 3 成像实验结果及应用讨论

#### 3.1 成像本领测量

样品是在铝板上打出的大小不同的孔, 最大孔的直径是 6mm, 中间的孔按每 0.5mm 的步长递减, 最小孔的直径是 1mm. 通过成像结果可以看出, 可以分辨出来的最小孔径是 1mm. 采用非球面镜可进一步缩小光斑至衍射极限, 提高成像分辨率. 图 3 中 (a)为实物照片, (b)为系统成像的结果, 样品尺寸为 140mm × 85mm.

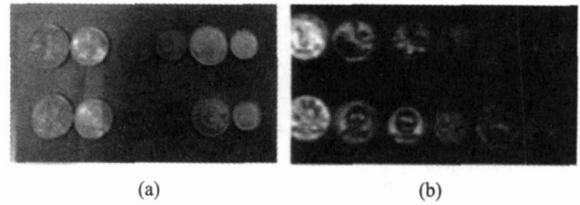


图4 硬币成像结果 (a)为实物图 (b)为系统成像结果. 纸板尺寸为 140mm × 85mm

Fig.4 The images of coins embedded on a card board (a) photo picture of the samples (b) THz image of the samples. The size of the card board is 140mm × 85mm

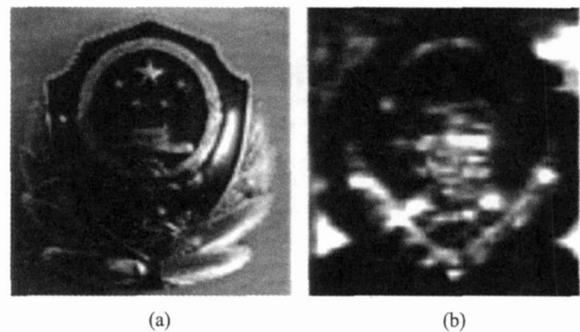


图5 公安帽徽成像结果 (a)为实物图 (b)为系统成像结果. 样品尺寸为 60mm × 60mm

Fig.5 The images of a police badge (a) photo picture of the sample (b) THz image of the sample. The size of the badge is about 60mm × 60mm

#### 3.2 物体外部结构成像

本部分一共测试了 3 个样品. 图 4 为附着了各种硬币的一块硬纸板, 图 5 为公安帽徽, 图 6 为毛主席像章. 三种样品均为表面镀铝或者涂漆的金属, 成像结果表明本系统对于镀铝等高反射面, 可以较好地体现样品表面特征; 但是对涂漆的表面 (比如图 5) 以及较为复杂和较小细节 (比如图 4 中的细节) 不能很好地反映出来, 这主要是受到系统空间分辨率的限制. 对于各种颜色的喷漆结果, 将在下一步实验中进行研究.

本部分共有三个样品, 其中两个为航天工业中实际检测用的预埋缺陷板, 一个为内嵌金属骨架的塑料飞机模型. 其中图 7 为碳纤维基底的吸波涂层, 并在粘贴层预埋了若干位置未知的缺陷. 在检测这种物体的时候, 图 7(a)中预埋的 12 个大小不同的缺陷均可在 (b)中清晰地分辨出位置和形状, 太赫兹辐射强度的变化主要来源于涂层材料厚度和夹层的不同. 这说明太赫兹脉冲透过吸波涂层, 收集到的信号主要是从样品的碳纤维基底反射回来的. 这项实验的结果不仅说明太赫兹脉冲对碳纤维基底材

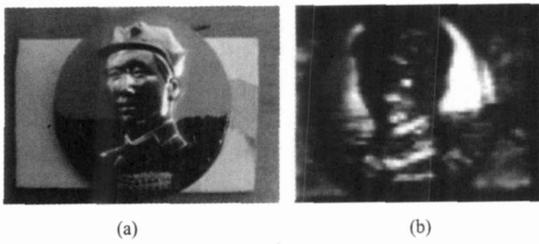


图6 主席像章成像结果 (a)为实物图 (b)为系统成像结果. 样品尺寸为65mm×65mm  
Fig. 6 The images of a badge of Chairman Mao (a) photo picture of the sample (b) THz image of the sample. The size of the sample is about 65mm×65mm

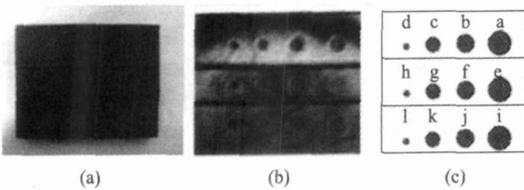


图7 航天泡沫预埋缺陷样品1 (a)为实物图 (b)为系统成像结果 (c)为预埋缺陷位置. 样品尺寸为105mm×135mm  
Fig. 7 Foam sample tile with pre-built defects (a) photo picture of the sample (b) THz image of the sample (c) defects layout. The size of the tile is 105mm×135mm

料具有高反射性,而且证明了这种微波波段的吸波涂层材料对太赫兹波吸收很小,因此太赫兹波有可能成为今后航空工业对于此种涂层材料有效的检测手段,从而为今后此种成像装置在航天工业无损探伤中更为广泛应用提供了可能.

图8为铝板上喷涂了314μm防护漆层,在漆层和铝板之间预埋人工缺陷聚四氟乙烯,同样得到了很好的结果.太赫兹波穿透了漆层,从铝板反射回的信号可以分辨出所有的缺陷大小和位置.图9为塑料飞机模型,其中图9(b)中可以看到,太赫兹波穿透了塑料飞机的表层,从金属骨架处返回.图像中的白色亮线为飞机模型的金属骨架.通过这一组样品的成像结果,可以看出由于本系统对一些非金属涂层材料,尤其是微波波段的吸波材料和防护涂料的高穿透性和对金属以及碳纤维基底材料的高反射性.这两种重要的特性使得太赫兹成像技术在无损检测和雷达成像方面具有很好的应用前景.

### 3.4 成像结果讨论

目前此成像系统由于受到光学元件的限制,焦斑较大.在以后的工作中我们会进一步优化光学元件,提高成像分辨率.对于成像速度,主要受锁相放大器积分时间及平移台移动速度制约,可以通过更换更高速平移台以及实现软件锁相来提高成像速

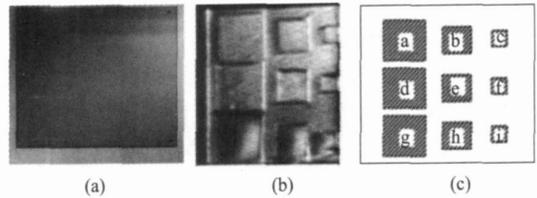


图8 铝板预埋缺陷样品 (a)为实物图 (b)为系统成像结果 (c)为预埋缺陷位置. 样品尺寸为100mm×100mm  
Fig. 8 Aluminum sample tile with pre-built defects (a) photo picture of the sample (b) THz image of the sample (c) defects layout. The size of the tile is 100mm×100mm

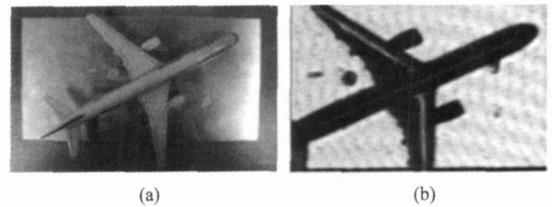


图9 飞机模型 (a)为实物图 (b)为系统成像结果. 样品尺寸为100mm×140mm  
Fig. 9 The images of a model air plane (a) photo picture of the sample (b) THz image of the sample. The size of the sample is 100mm×140mm

度.此外,目前的返波太赫兹成像系统的探测方式是非相干的直接能量测量方式.通过采取外差式探测方法可以将功率测量变为振幅测量,比如将太赫兹波分束再进行混频.这种方式极大地提高了系统的动态范围,并且实现了对物体的位相测量,在简单的强度成像的结果上加入位相信息,从而扩大系统所携带的信息量,扩展其应用前景.

## 4 结论

介绍了利用返波振荡器(BWO)为源的太赫兹波反射式成像系统,它以返波振荡器做光源,焦热电探测器(Pyroelectric Detector)做信号采集工具,可分辨出直径最小为1mm的小孔.该系统可以用于无损检测探测、雷达成像和金属表面特征提取等.本文的相关实验已经表明了该系统产生的太赫兹辐射对于很多重要的非金属涂层材料,尤其是微波波段的吸波材料和防护涂料具有高透过性,而对金属和碳纤维基底具有高反射性,因此证明了其在工业无损检测方面具有的极大优势,随着研究的进一步深入,必将有广阔的应用前景.

致谢 本工作得到国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(Na 2007CB310408)和北京  
(下转 31页)

- 2003, **12** (1): 16—28
- [2] Starck J, Candès E J, Donoho D L. The curvelet transform for image denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, **11** (6), 2002: 670—684.
- [3] Pennec E L, Mallat S. Sparse Geometric image representation with bandelets[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14** (4): 423—438.
- [4] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14** (2): 2091—2106.
- [5] LU Wen, GAO Xin-Bo, ZENG Kai, et al. Image quality evaluation metrics based on HWD [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (路文, 高新波, 曾凯, 等. 一种基于 HWD 的图像质量评价测度. *红外与毫米波学报*), 2009, **28** (1): 72—76.
- [6] ZHANG Lin, FAN Zhi-Jun, WANG Sheng-Qian, et al. Multiscale adaptive denoising method based on genetic algorithm [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (章琳, 方志军, 汪胜前, 等. 基于遗传算法的多小波自适应去噪方法研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28** (1): 77—80.
- [7] AN Zhi-Yong, CUI Jiang-Tao, ZENG Zhi-Yong, et al. Image retrieval based on radon and wavelet transform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (安志勇, 崔江涛, 曾智勇, 等. 基于 Radon 和小波变换的图像检索. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (2): 147—151.
- [8] Cunha A L, Zhou J, Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15** (10): 3089—3101.
- [9] Laine A, Fan J, Yang W. Wavelets for contrast enhancement of digital mammography [J]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 1995, **14** (5): 536—550.
- [10] Bovis K, Singh S. Enhancement technique evaluation using quantitative measures on digital mammograms [C]. The 5th International Workshop on Digital Mammography, Toronto, Canada, 2000: 547—553.
- [11] Suckling J, Parker J, Dance D, et al. The mammographic images analysis society digital mammogram database [C]. Excerpta Medica, International Congress Series, **1069**: 375—378.

(上接 18 页)

市人才强教项目 (No. 2006CB302901) 和国家自然科学基金 (No. 10390160) 支持; 同时得到中科院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室开放基金的支持。

感谢赵国忠老师在本工作中的指导和支持, 同时也感谢科研组袁宏阳、牧凯军、邓朝、于斐同学的大力帮助。

## REFERENCES

- [1] Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong, et al. *Terahertz Sensing and Imaging* [M]. Beijing: National defense industry press (张存林, 张岩, 赵国忠, 等. 太赫兹感测与成像. 北京: 国防工业出版社), 2008.
- [2] Hess L, Cheville R. Nondestructive evaluation of ceramic bearings using THz impulse ranging, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) [C], 1, 729, 2004.
- [3] Wiltse J. History of millimeter and submillimeter waves, IEEE Trans Microwave Theory Tech [C]. MTT-32: 1119—1127, 1984.
- [4] Adrian Dobriu, Masatsugu Yamashita, Yuichi N Ohshir-  
ma, et al. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator [J]. *Applied Optics*, 2004, **43** (30): 5637—5646.
- [5] Chang M, Chou P, Lee H. Tomographic microwave imaging for nondestructive evaluation and object recognition of civil structures and materials [C]. Conference Record of The Twenty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 1996, **2**: 1061.
- [6] Sasaki A, Nagatsuma T. Reflection-type CW millimeter-wave imaging with a high-sensitivity waveguide-mounted electro-optic sensor [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2002, **41**: 83.
- [7] Lash A, Yundev D. Submillimeter imaging with a pyroelectric TV camera [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1984, **5**: 489.
- [8] Löffler T, Kress M, Thomson M, et al. Comparative performance of terahertz emitters in amplifier-laser-based systems [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**: S134.
- [9] Mei Z, Dou W. Performances of hyperbolic and spherical lens imaging systems at millimeter wavelengths [J]. *J. of Electromagn. Waves and Appl.*, 2002, **16**: 1077.
- [10] Wang S, Zhang X. Terahertz tomographic imaging with a Fresnel lens [J]. *Opt. Photon. News*, 2002, **13**: 59.