

基于自制太赫兹检测器的快速成像系统

孙振龙¹ 涂学凑¹ 姜奕² 康琳¹ 陈健¹ 吴培亨¹

(¹ 南京大学超导电子学研究所, 江苏 南京 210093)
(² 南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘要 利用直径为 30 cm 卡塞格伦反射镜搭建了一套反射式太赫兹 (THz) 主动成像装置, 并成功运用 0.22 THz 的辐射源在室温下进行成像。分别使用自行制备的 Nb₅N₆ 微测热辐射计 THz 常温检测器和商用 VDI 检测器进行成像并对结果进行了分析。成像的物体是 5 根并排排列的铜棒, 铜棒直径为 1.4 cm, 间距为 5 cm。改变参考频率, 扫描速度, 将成像时间从 15 s 减少到 7.5 s。成像的范围约为 20 cm × 6.5 cm。两种检测器的成像分辨率达到 1.41 cm。

关键词 成像系统; 太赫兹; 卡塞格伦反射镜; 快速成像

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0811002

Fast Imaging System Based on Self-Made Terahertz Detector

Sun Zhenlong¹ Tu Xuecou¹ Jiang Yi² Kang Lin¹ Chen Jian¹ Wu Peiheng¹

(¹ *Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China*)
(² *Nanjing Institute of Electronic Technology, Nanjing, Jiangsu 210039, China*)

Abstract An active imaging system has been constructed by using a Cassegrain reflector with the diameter of 30 cm. The system works at room temperature and 0.22 THz. The detectors are self-made Nb₅N₆ microbolometer THz detector and commercial VDI detector. Images for 5 parallel copper rods with the diameter of 1.4 cm and space of 5 cm are got and analyzed. The imaging time is reduced from 15 s to 7.5 s by changing the reference frequency and scanning velocity. The range of the image is 20 cm × 6.5 cm. The special resolution of the images is about 1.41 cm for the two detectors.

Key words imaging system; terahertz; cassegrain reflector; fast imaging

OCIS codes 110.6795; 040.5160; 120.4630

1 引 言

太赫兹波 (THz) 是指频率在 0.1 THz ~ 10 THz (1 THz = 10¹² Hz) 之间的电磁波。该波段位于毫米波与红外波段之间。太赫兹波和其他波段的电磁辐射一样可以用来对物体成像, 而且根据太赫兹波的高透、无损以及大多物质在太赫兹波段都有指纹谱等特性, 使太赫兹成像相比其他成像方式更具优势。但是在 20 世纪 80 年代前期, 由于技术手段的原因, 导致该波段的开发利用基本上处于空白的状态。THz 成像技术的进一步发展需要高功率、便携式、可调谐的 THz 辐射源, 宽频谱、高灵敏度、低噪声的检测器和快速、高效的数据处理方法,

已经有越来越多的研究小组致力于这些方面的探索和尝试^[1-4]。

随着对太赫兹波新特性的深入了解, 太赫兹成像技术快速发展起来, 涌现出了许多诸如太赫兹二维光电取样成像、层析成像、太赫兹啁啾脉冲时域场成像、近场成像、太赫兹连续波成像等。目前一种研究较多的太赫兹成像方法是, 使用太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS), 同步移动待测样品得到图片。Hu 等^[5] 在 1995 年利用 *x-y* 位移台, 对树叶和半导体芯片等实现使用 THz-TDS 系统的成像。THz-TDS 系统通过将太赫兹脉冲通过样品的样品信号和它在自由空间中传播同等长度距离后的参考信号

收稿日期: 2014-02-25; **收到修改稿日期**: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金 (11173015)

作者简介: 孙振龙 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail: njuszl@163.com

导师简介: 陈健 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事超导器件及其应用等方面的研究。E-mail: chenj63@nju.edu.cn

进行比较,不仅可以得到样品的太赫兹图像,还能通过简单的计算获得样品的复折射率、介电常数和电导率等。而太赫兹连续波(CW)成像系统可以提供更好的空间分辨率和成像质量,并且成本相对低,成像速度快^[6]。

成像方式分为主动成像和被动成像。主动成像,即发射太赫兹信号辐射成像物体,提取其反射或透射的信号功率和相位成像。被动成像,即不发射太赫兹信号辐射被测物体,提取被测物体自身的太赫兹辐射或者反射环境的太赫兹辐射成像。主动成像的系统一般由三部分组成,即太赫兹源、检测器和光学系统。被动成像的系统一般由两部分组成,即太赫兹检测器和光学系统。但是由于物体自身的辐射非常微弱,被动成像需要非常高灵敏度的检测器,相反主动成像则不需要,因为人工的信号源功率相比物体自身的辐射要大很多^[7]。

本文中要研究的成像方法是,对一个有一定距离的目标(大于 1 m)成像,而且成像过程中目标没有同步的移动。扫描采用旋转的方式进行可以达到较快的速度,因为采用光栅扫描时,扫描镜需要重复运动到静止再运动,物体总有一定的惯性,所以这样比较慢,如果扫描镜一直旋转,就不需要改变其运动状态,这样就加快了扫描速度。利用这种方法,提高了扫描速度,将成像时间从 15 s 降低到 7.5 s。并

且使用两种不同的检测器对物体进行成像,分析和对比了成像的结果。

2 主要研究内容

使用一个直径为 30 cm 的卡塞格伦反射镜作为成像装置的主要部分,其主镜为椭球面,副镜为抛物面^[8]。没有设计为球面,是因为口径增大,会有较大的像差,所以采用非球面设计,这样可以减小像差,使成像系统性能达到受衍射限制而不是受像差限制。

太赫兹信号源型号为 VDI-Tx-165,使用频率为 0.22 THz,功率约为 15 mW。太赫兹信号通过一个离轴抛物镜准直,透过光束分离器,穿过卡塞格伦反射镜的主镜中间的孔,打到副镜并经其扩散到主镜的镜面,经过平面镜反射镜聚焦到成像物体上。物体反射太赫兹信号,经原光路返回至光束分离器反射,最后通过一个聚焦透镜入射到检测器上。目前使用单像素的检测器,需要扫描系统,采用的是旋转扫描。在主镜前,使用一个直径为 30 cm,可以偏轴旋转,同时在另一垂直方向上旋转的平面镜作为扫描镜。使用一个角移台做缓慢旋转,三相伺服电机安装在平面镜后,其转轴与平面镜法线方向有一小角度 α ,电机快速旋转,以达到快速扫描的目的,扫描轨迹是一组平行移动的椭圆轨迹。系统如图 1 所示。

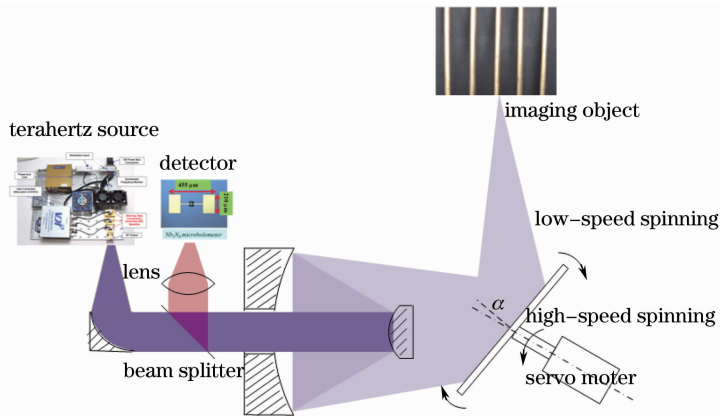


图 1 系统框图

Fig. 1 Imaging system

对太赫兹信号进行调制,数据采集卡同时采集经过放大的检测器信号和参考通道的信号。执行过程中,伺服电机归零,每次都从同一个位置开始移动。然后开始加速到匀速运动。匀速运动中每转动一个角度,在实时系统集成总线(RTSI)上产生一个中断信号,驱动数据采集卡内部计数器触发一定数目的脉冲,并在每个脉冲的上升沿采样。将采样的

数据和参考通道的信号一起,在计算机中处理,等效于实现锁相放大器的功能。每次中断采集的数据经过处理后相当于采集了一个像素。每两次中断的时间间隔要大于 5 个参考通道的周期,这样锁相放大器才能得到较好的效果。进一步计算可以得到,参考频率与扫描速度之间的关系。通过这样的关系,改变系统参数,可以提高成像时间。

3 结 果

实验中使用的太赫兹检测器分别是自行制备的 Nb₅N₆ 微测热辐射仪 THz 常温检测器(Nb₅N₆ 检测器)和 VDI WR4.3R3ZBD 检测器(VDI 检测器)。Nb₅N₆ 检测器的等效噪声功率为 4×10^{-11} W/Hz^{1/2}, 响应率为 300 W/V^[9-10]。VDI 检测器的等效噪声功率为 1.5×10^{-12} W/Hz^{1/2}, 响应率为 1200 V/W。

对 5 根并排排列的铜棒(如图 2 所示)进行了成像。铜棒直径为 1.4 cm, 间距为 5 cm。成像的范围约为 20 cm × 6.5 cm。系统分辨率约为 1.41 cm。成像时间主要由扫描速度与参考频率决定。设置系统参数, 采样频率为 20 kHz, 调制频率为 1 kHz, 扫描时间设为 15 s。图 3 和图 4 分别显示的是 Nb₅N₆ 检测器和 VDI 检测器曝光 15 s 的成像结果。

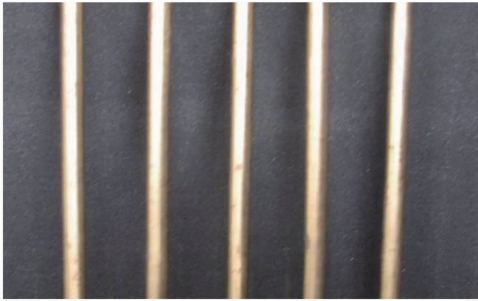


图 2 成像铜棒实物图(直径为 1.4 cm, 间距为 5 cm)
Fig. 2 Copper rods in reality (diameter of 1.4 cm and space of 5 cm)

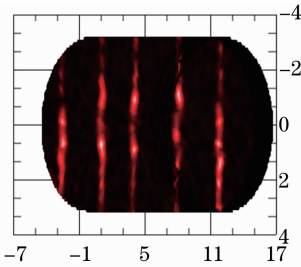


图 3 15 s 成像结果(Nb₅N₆ 检测器)
Fig. 3 Image of 15 s(Nb₅N₆ detector)

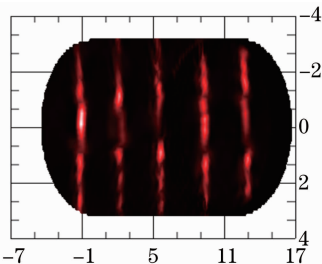


图 4 15 s 成像结果(VDI 检测器)
Fig. 4 Image of 15 s (VDI detector)

提高采样频率、调制频率、扫描速度等成像系统参数。采样频率为 40 kHz, 调制频率为 2 kHz, 扫描时间设为 7.5 s。图 5 和图 6 分别显示的是 Nb₅N₆ 检测器和 VDI 检测器曝光 7.5 s 的成像结果。

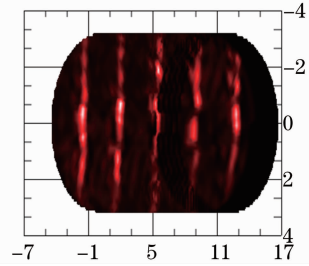


图 5 7.5 s 成像结果(Nb₅N₆ 检测器)
Fig. 5 Image of 7.5 s (Nb₅N₆ detector)

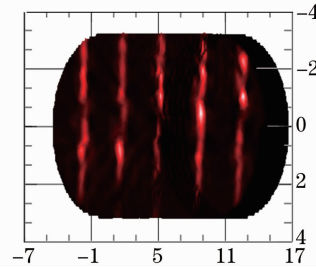


图 6 7.5 s 成像结果(VDI 检测器)
Fig. 6 Image of 7.5 s (VDI detector)

图 3~6 显示的是两种检测器在不同的曝光时间成像的结果。将这些结果进行对比和分析。图 3~6 中背景的干扰来自通过散射等途径耦合到检测器中的信号。比如会有部分信号从反射镜组的副镜中心附近反射回去, 经分束器耦合到检测器中, 所以使用吸波材料将其中中心附近的反射信号吸附遮挡住。但吸波材料不是理想的, 仍然有较小的反射和散射, 造成了背景的干扰。从理论上讲, VDI 检测器的等效噪声功率比 Nb₅N₆ 检测器的要低, 检测器的灵敏度更高, 检测的信号应该更强, 成像应该更清晰。从成像结果比较来看, 两种检测器的成像结果在清晰度和分辨率上相差不大。这是由于成像系统造成的。虽然 VDI 检测器的噪声等效功率低, 探测的信号强度更大, 但是由于系统的原因, 检测器中有来自通过散射等途径耦合的噪声信号, 整个系统的信噪比没有得到很好的提高。使用 VDI 检测器时, 系统的信噪比为 20 dB; 使用 Nb₅N₆ 检测器时, 系统的信噪比为 19 dB。最后, 成像时间缩短, 实际成像的效果会有所降低, 原因是锁相放大器在相同的积分时间内, 扫描时间越长, 信号处理的效果越好。

通过比较,发现 Nb_5N_6 检测器制作工艺简单,成本低;器件一致性好,容易制作大规模阵列;器件不易受静电影响,耐用。对于实验中发现的问题,提出了三个方案,准备在后续的实验中进行。1) 减少耦合进检测器中的背景干扰,在可能发生散射的地方使用吸波材料,将散射降到最低。2) 采样数字图像处理的方法,去除成像结果中的噪声。3) 使用阵列检测器进行成像,将提高系统的信噪比,还可以大大降低成像时间。

4 结 论

研究并搭建了一套快速成像系统,并且成功利用这套系统对物体进行了成像。分别使用 VDI 检测器和 Nb_5N_6 检测器在不同的曝光时间内成像,分析结果得出实验中存在的问题,并提出了解决方案。

在国外,已经有很多研究小组和公司开展这一方面的研究,并取得了不错的成果。如国外某研究所在 0.645 THz 利用单像素检测器上进行成像,成像时间为 9 s,分辨率达到 4 mm。还有一些商用的太赫兹成像系统,使用电荷耦合器件(CCD)阵列检测器,可以进行实时成像。国内对于太赫兹成像的研究虽然起步晚,但是已经获得了较大的进步。有研究机构利用 CO_2 抽运太赫兹激光器所搭建的 2.52 THz 成像系统可以达到 0.4 mm 的分辨率,并且也在向阵列检测器方向发展,以达到实时成像。所以,下一步的工作有两点可以继续研究:1) 提高成像系统的工作频率,可以进一步提高成像分辨率;2) 使用阵列检测器,可以大大降低成像时间。

太赫兹成像今后的发展,一方面是高灵敏度和高集成度检测器的研制,国外已经有工作于低温 0.3 K,集成度 64 pixel \times 64 pixel,噪声等效功率达到 10^{-19} W/Hz $^{1/2}$ 的检测器,工作于常温的检测器噪声等效功率也有 10^{-11} W/Hz $^{1/2}$,如高电子迁移率晶体管检测器。另一方面是高功率,操作方便的太赫

兹信号源的研制。由于被动成像对检测器要求极高,使得被动成像系统成本很高,而且操作相对复杂,所以很多情况下更适合使用主动太赫兹成像。此外,更多其他种类的成像方法,如太赫兹雷达成像、全息成像、计算机断层扫描成像、近场成像以及三维成像等技术都在发展中。

参 考 文 献

- 1 Zhang Zhenwei, Cui Weili, Zhang Yan, *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy imaging [J]. *Journal of Infrared and Millimeter 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.
- 2 Kawase K. Terahertz imaging for drug detection and large-scale integrated circuit inspection [J]. *Optics & Photonics News*, 2004, 15(10): 34–39.
- 3 Clery D. Brainstorming their way to an imaging revolution [J]. *Science*, 2002, 297: 761–763.
- 4 Liu Ying, Pan Yulong, Wang Xuejin, *et al.*. Design of imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi-band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2065–2071.
刘 英, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2065–2071.
- 5 B B Hu, M C Nuss. Imaging with terahertz waves [J]. *Opt Lett*, 1995, 20(16): 1716–1718.
- 6 Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(2): 023001.
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 023001.
- 7 Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao, *et al.*. Study on the passive terahertz image target detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0211002.
张 馨, 赵源萌, 邓 朝, 等. 被动式太赫兹图像目标检测研究 [J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0211002.
- 8 W V Spiegel, C A Weg, R Henneberger, *et al.*. Illumination aspects in active terahertz imaging [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(7): 2008–2013.
- 9 X C Tu, L Kang, X H Liu, *et al.*. Antenna-coupled microbolometer array for terahertz detection [C]. *Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 37th International Conference on IEEE, 2012.
- 10 Xuecou T, Lin K, Xinhua L, *et al.*. Nb_5N_6 microbolometer arrays for terahertz detection [J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(4): 040701.

栏目编辑:张浩佳