

# 太赫兹射线成像的进展概况

张 蕾<sup>1</sup> 徐新龙<sup>2</sup> 汪 力<sup>2</sup> 李福利<sup>1</sup>

(1 首都师范大学物理系 北京 100037; 2 中国科学院物理研究所光物理开放实验室 北京 100080)

## 摘 要

太赫兹辐射介于微波和红外之间,本文回顾了太赫兹射线成像的进展情况.与微波、X 射线、核磁共振 NMR (nuclear magnetic resonance) 成像相比,太赫兹成像不仅能给出物体的密度信息,而且能给出频率域的信息,以及在光频、微波和 X 射线范围内所不能给出的材料的转动、振动信息.太赫兹射线与其他频段的电磁波相比,它能量低,不会造成对生物样品的电离损伤,而且太赫兹射线很容易穿过介电材料,因而可以用于产品的安全监测、纳米材料的无损探伤.因此太赫兹成像技术在生物学、工业安全监测等方面有可能带来新的关键性的突破.

**关键词:** 太赫兹成像,

**中图分类号:** O 433.1

## 0 引 言

THz 辐射通常指的是波长在  $1\text{ mm} \sim 100\ \mu\text{m}$  ( $300\text{ GHz} \sim 3\text{ THz}$ ) 区间的远红外电磁辐射,其波段位于微波和红外之间.在 20 世纪 80 年代中期以前,由于缺乏有效的产生和检测方法,人们对于该波段电磁辐射性质的了解非常有限,以致该波段被称为电磁波谱中的 THz 空隙,该波段也是电磁波谱中有待进行全面研究的最后一个频率窗口.近十几年来,超快激光技术的迅速发展,为 THz 脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源,使 THz 辐射的机理研究、检测技术和应用技术得到蓬勃发展. THz 技术之所以引起广泛的关注,是由于太赫兹电磁波有其独特的特点,它在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文、宽带移动通讯、尤其是在卫星通讯和军用雷达等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景.<sup>[1]</sup>

可见光、X 射线、电子束、中红外、近红外和超声波是在医学诊断、材料分析以及工业生产等诸多领域中广泛应用的主要成像信号源.与以上的光源相比,太赫兹电磁波对于某些电介质材料具有很强的

穿透效果.除了可测量由材料吸收而反映的空间密度分布外,还可以通过相位测量得到折射率的空间分布,从而获得与材料相关的更多信息,这是太赫兹时域光谱的独特优点.电磁波成像,相对于可见光和 X 射线具有非常强的互补特征,特别适合于可见光不能透过、而 X 射线成像的对比度又不够的场合.此外,太赫兹电磁波的光子能量极低 ( $1\text{ THz}$  约  $4.1\text{ meV}$ ),没有 X 射线的电离性质(光子能量在 keV 量级),不会对材料造成破坏. THz 电磁波可以穿过衣服和皮肤,但是它不会像 X 射线一样对人体构成伤害.利用 THz 电磁波可以检查机场通关的旅客与行李,检查邮件中是否藏有毒品、炭疽菌粉或炸弹等违禁物品. THz 脉冲成像的非破坏性和非接触性对研究珍贵艺术作品和研究古生物化石等样品很有价值.例如透过艺术品的表面对内部可视化,无需接触或破坏易损的纸张而确定书籍的内容等.另外,对诸如火焰的热分析、塑料封装集成电路的引线图成像、聚合物内部的气泡以及陶瓷中的裂缝探测等,太赫兹时域谱成像都是极有前途的技术.自太赫兹电磁波被首次用于成像以来,各种太赫兹成像技术相继问世.如太赫兹近场成像技术,太赫兹层析成像技术,时域太赫兹逆向变换成像技术等等.<sup>[2,3]</sup>

# 1 太赫兹成像的像素信息

太赫兹电磁波成像的基本原理是:利用已知波形的太赫兹电磁波作为成像射线,透过成像样品(或从样品反射)的太赫兹电磁波的强度和相位包含了样品复介电常数的空间分布.将透射的太赫兹电磁波的强度和相位的二维信息记录下来,并经过适当的数字处理和频谱分析,就能得到样品的太赫兹电磁波的三维图像.太赫兹波成像技术的一个显著特点是信息量大,每一像源对应一个太赫兹时域谱,通过对时域谱进行傅里叶变换又可得到每一点的太赫兹频率响应谱.

一般地,首先未加样品时,利用 Sampling 方法得到 THz 波形,作为参考信息;然后加进样品,得出该像素的波形信息.传统的透射型太赫兹成像,每个像素能给出的信息包括:归一化峰值振幅信息,归一化脉冲延迟信息,脉宽信息等,视具体情况去提取各种不同的信息.太赫兹成像的时域信息的情况见图 1:其中红色波形是参考信号,白色波形是通过样品后的信号,它包含有样品的信息,具体的信息提取可用图示的方程.

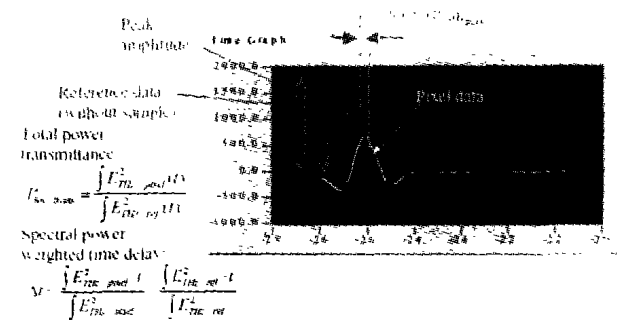


图 1 太赫兹成像的时域信息

经过傅立叶变换后,我们得到频域的信息,它包括,1,某一频率的振幅变化信息;2,某一频率的位相变化信息;3,某一频率范围的强度积分信息;4,某一频率的  $\ln(a/n)$  值(同时考虑了振幅和位相)以及透射率,时间延迟,吸收率,折射率等,如图 2 所示.

# 2 太赫兹扫描成像

## 2.1 透射型扫描成像

第一个太赫兹成像,是 1995 年由 Hu Binbin<sup>[4]</sup> 等人得到.该成像系统是基于电光太赫兹时域光谱技术.太赫兹时域波形通过 800 纳米的脉冲激光激发光导体转换到太赫兹的范围内得到,他们利用数字电路进行实时的数字信号处理.每个像素的信息

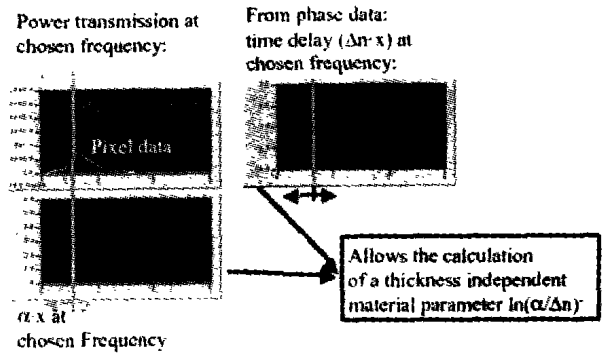


图 2 太赫兹成像的频域信息

是通过在 1~3 太赫兹范围内积分得到,具体光路图见图 3.他们未采用锁相放大器,因此 S/N 很低,对于数据处理他们提出语音识别算法用于提取振幅和位相信息.对于 4.5 cm \* 2.3 cm 树叶的太赫兹成像,共取了 30000 像素,频谱分辨率为 0.02 THz,空间分辨率为 0.25 mm.图 4 为利用透射扫描成像获得的新鲜树叶和两天后的树叶的含水量的分布图像.

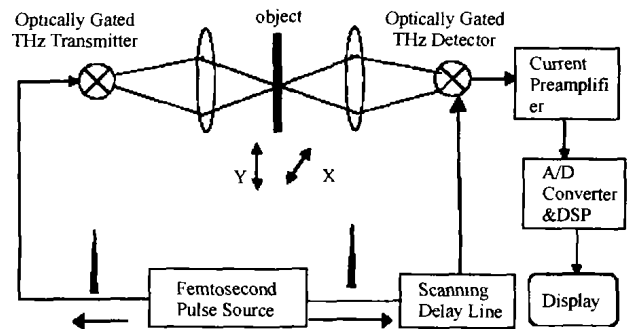


图 3 太赫兹透射型扫描成像示意图

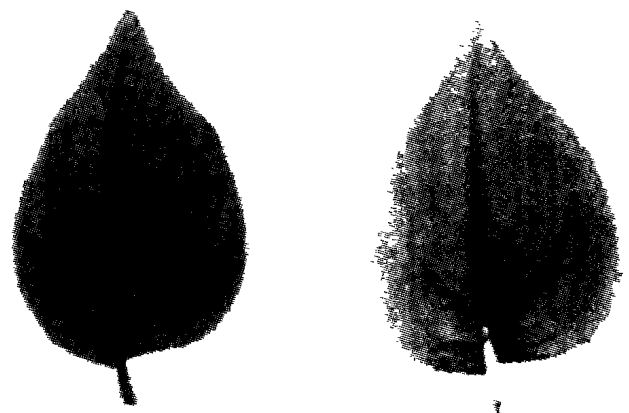


图 4 新鲜树叶和两天后的树叶的含水量分布图像

## 2.2 反射型扫描成像

D. M. Dorney 等人<sup>[5,6]</sup>研究了太赫兹反射成像的情况,从物体反射回来的波被用来作为成像信息.太赫兹脉冲从折射率不连续的物体反射回来,时间延迟必然与物体的折射率有关(见图 5).为了提高深

度分辨率,他们利用了位相转换的干涉仪装置,这可以去除背景噪声,从而可以大大提高信噪比.提高了深度分辨率,可分辨相干长度的 2%<sup>[5-10]</sup>.

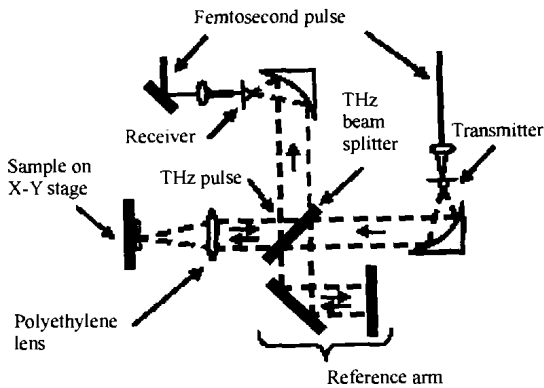


图 5 太赫兹反射型扫描成像示意图

### 3 太赫兹实时成像

#### 3.1 利用电光晶体和 CCD 实现实时成像

利用电光晶体和 CCD 实现实时成像,与扫描成像相比,可以很快地提高信息的提取速度.由于 CCD 不能捕捉到太赫兹信号,为此必须利用电光晶体进行频率转换.每个像素点所对应的电光晶体的折射率的变化是由太赫兹电场的强度所决定的.当另一束激光穿过电光晶体时,由于太赫兹场所引起的晶体的折射率的变化将会调制通过晶体的激光,因而太赫兹信息被转化为光频信息.

1996 年,张希成等人利用上述原理实现了实时成像,具体的光路图见图 6<sup>[11,12]</sup>.图 7 为他们获得的活体昆虫(蚯蚓和蚂蚁)的二维实时像.

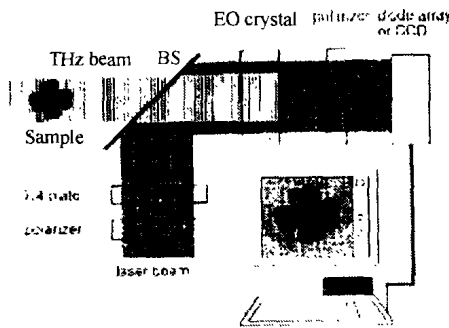


图 6 太赫兹实时成像示意图

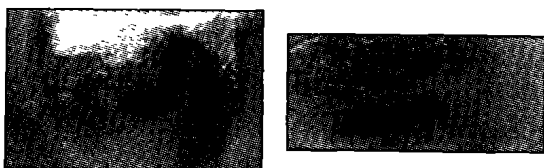


图 7 蚯蚓和蚂蚁的二维 THz 实时像

#### 3.2 利用啁啾脉冲技术进行的太赫兹实时成像

Zhiping Jiang 等人发展了利用啁啾脉冲技术进行的太赫兹实时成像的技术.他们将探测光脉冲经过光栅对色散后在频域展宽,利用电光晶体将 THz 波形编码到展宽的光脉冲上,然后在 CCD 上一次性探测到太赫兹的波形.为此要求先拍一张背景图,然后将信号图减去背景图可得到 THz 波形.这样可以进一步提高信号的提取速率,具体的光路图见图 8.在此基础上他们拓展了条纹像机的测量范围,具体的光路图见图 9<sup>[13-15]</sup>.

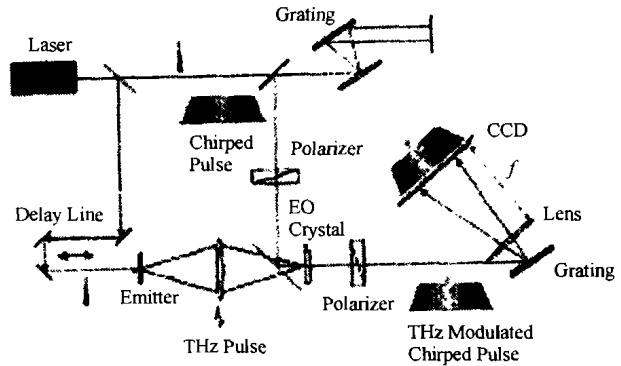


图 8 利用啁啾脉冲技术进行的太赫兹实时成像示意图

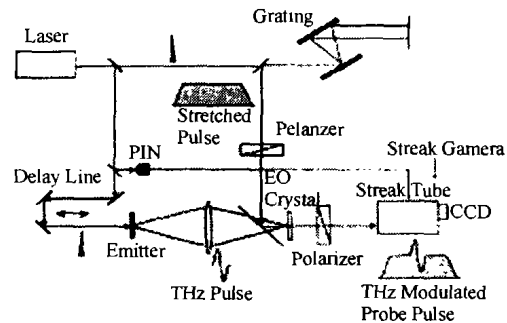


图 9 利用 EO(电光晶体)和条纹照像机实现实时成像示意图

### 4 太赫兹近场成像

为了进一步提高分辨率,S.Hunsche 等人<sup>[16]</sup>在 1998 年第一次提出太赫兹近场成像.我们知道在近场情况下,分辨率不再由波长决定而是决定于孔径的大小.他们利用 Al 掺 Cr/Ni 合金做成尖锥形结构,将分辨率提高到  $\lambda/4$ ,如图 10 所示.

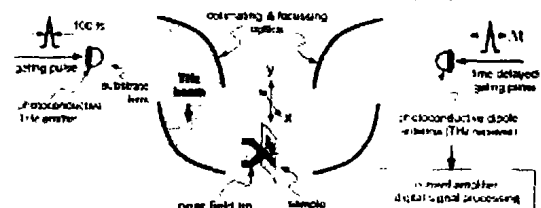


图 10 太赫兹近场成像示意图

Mitrofanov 等人报道了基于光导天线机制的太赫兹近场成像.他们在  $< 100 >$  的半绝缘 GaAs ( $50 \mu\text{m}$ ) 上用分子束外延法生长上  $1 \mu\text{m}$  厚的 GaAs,为了控制刻蚀,在 LTGaAs 和 GaAs 间用  $50 \text{ nm}$  的 AlGaAs 隔开;然后在 LTGaAs 上制作长  $60 \mu\text{m}$  的偶极天线.为了得到尖锥形状,他们将  $50 \mu\text{m}$  厚的 GaAs 用 Photoresist 遮上,通过刻蚀的方法刻在偶极天线上形成的锥形高  $25 \mu\text{m}$ ,如图 11 所示<sup>[17-19]</sup>.

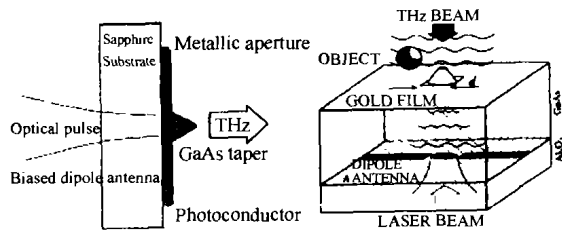


图 11 基于光导天线机制的太赫兹近场成像

## 5 太赫兹 CT

张希成等人报道了太赫兹射线计算机辅助成像 (T-ray computed tomography) 即 T-ray CT.在实验中,一波长为  $800 \text{ nm}$ ,脉宽为  $130 \text{ fs}$ ,单脉冲能量为  $700 \mu\text{J}$ ,重复频率为  $1 \text{ kHz}$  的钛宝石锁模激光器被用于产生太赫兹脉冲.太赫兹脉冲的发射体是  $1.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$  的 GaAs 光电导天线.太赫兹波经过准直后,用焦距为  $15 \text{ cm}$  的离轴抛物面反射镜会聚在成像样品上.该系统中太赫兹波的焦斑为  $1 \text{ mm}$ ,瑞利长度为  $20 \text{ mm}$ .透过样品的太赫兹波经准直后再由离轴抛物面反射镜将其聚焦到一块 ZnTe 电光晶体上,成像的方式是在  $x$  和  $z$  方向上平移扫描成像样品,这等效于用细太赫兹波束扫描成像样品.为提高成像速率,实验中应用了啁啾探测光的技术探测太赫兹波<sup>[20]</sup>.

太赫兹 CT 成像技术更受重视,它与 X 射线 CT 比较,可以获得更丰富的信息来处理图像,不仅可以获得被测物的吸收率的三维分布,而且可以获得折射率或介电常数的三维分布.图 12 和图 13 是示意图.

## 6 展 望

太赫兹成像技术还可以对纳米材料、半导体材

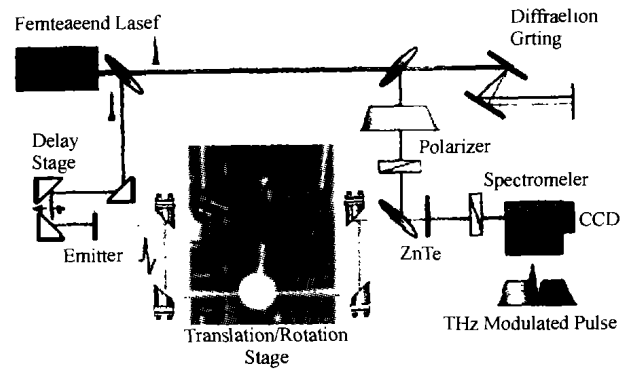


图 12 太赫兹 CT 实验图



图 12 一个球状物体的太赫兹 CT 像

料或超导体材料物理特性的分布特征进行研究,如测量超导电流的矢量场分布图像等.而且太赫兹成像在生物医学样品中的应用也已经得到了广泛的关注.太赫兹近场成像技术已经使得其分辨率达到了波长以下的尺度,利用近场成像和“动态孔径”的原理,目前太赫兹显微成像的分辨率已达到几十微米.在较长的一段时间里,太赫兹成像技术应用中的障碍之一在于设备复杂昂贵,对图像信息的分析和处理技术也有待进一步实用化.目前,THz 系统已经实现了小型化,而连续 THz 辐射的产生技术也将使 THz 技术不再依赖于昂贵的飞秒激光器.可以乐观地期望,随着技术的发展,THz 成像的应用前景将是非常广阔的.

## 参 考 文 献

- 1 Fattinger C, Grischkowsky D. Point Source Terahertz Optics. *Applied Physics Letters* 1988, 53, 1480
- 2 Hu B B, Zhang X C. Free-space radiation from electro-optic crystals. *Applied Physics Letters* 1990, 56, 1480
- 3 Wu Q, Zhang X C. Free-space electro-optic sampling of terahertz beam. *Applied Physics Letters* 1995, 67, 3523
- 4 Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves. *Optics Letters* 1995, 20, 1716
- 5 Mittleman D M, Stefan Hunsche et al. T-ray tomography. *Optics Letters*. 1997, 20, 904
- 6 Jon L. Johnson, Mittleman D M et al. Enhanced depth resolution in terahertz imaging using phase-shift interferometry. *Applied Physics Letters*, 2001, 78, 835
- 7 Jon L. Johnson, D. M. Mittleman et al. Background-free THz imaging using interferometric tomography Report, 2001
- 8 Jon L. Johnson, Mittleman D M et al. Interferometric Imaging with terahertz Pulses. *IEEE Journal selected topics quantum electronics*, 2001, 7, 592
- 9 Mittleman D M, Gupta M et al. Recent advances in terahertz imaging, *Applied Physics B*, 1999
- 10 Mittleman D M, Nuss M C et al. T-ray Imaging. *IEEE Journal selected topics quantum electronics*, 1996, 2, 679
- 11 Wu O, Zhang X C et al. Dynamic range of an electro-optic field sensor and it imaging applications. *Applied Physics Letter* 1996, 68, 3224
- 12 Wu Q, Zhang X C et al. Two dimensional electro-optic imaging of THz beams. *Applied Physics Letter* 1996, 69, 1062
- 13 ZhiPing Jiang, Zhang Xi Cheng. measurement of spatio-temporal terahertz field distribution by using chirped pulse technology. *IEEE Journal selected topics quantum electronics*, 2000, 36
- 14 Jiang ZhiPing, Zhang Xi Cheng. Single-shot spatiotemporal terahertz field imaging. *Optics Letters* 1998, 23
- 15 Jiang ZhiPing, Zhang Xi Cheng. Terahertz pulse measurement with an optical streak camera. *Optics Letters*, 1998, 1245
- 16 Hunsche S, Koch M et al. THz near-field imaging. *Optics Communications*, 1998, 150, 22
- 17 Mitrofanov O, Harel R et al. Study of Single-cycle pulse propagation inside a terahertz near-field probe. *Applied Physics Letters*, 2001, 78, 252
- 18 Mitrofanov O, Brener I et al. Near-field microscope probe for far infrared time domain measurements. *Applied Physics Letters*, 2000, 77, 591
- 19 Mitrofanov O, Brener I et al. Terahertz near-field microscopy based on a collection mode detector, *Applied Physics Letters*, 2000, 77, 3496
- 20 Zhang X C. T-ray Computed Tomography. *Hot Topic LEOS News Letter*, 2002

## Review of the Progress of T-Ray Imaging

Zhang Lei<sup>1</sup> Xu Xinlong<sup>2</sup> Wang Li<sup>2</sup> Li Fuli<sup>1</sup>

(1 Physics Department, Capital Normal University, Beijing 100037;

2 Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

### Abstract

In this paper, We present an overview of recent progress of T-ray imaging. Compared with microwave, X-ray imaging and NMR (nuclear magnetic resonance), T-ray imaging can give us not only the density picture but also the phase information within the frequency range. The unique rotational, vibrational and translational responses of materials (molecular, radicals and ions) within the THz range provide information that is generally absent in optical, X-ray and NMR images. The important characteristic of T-ray is that it has potential to detect the nature of low energy processes in physics, chemistry and biomedicine without the ionization. T-rays can also easily penetrate and image inside most dielectric materials and nano materials, which make it a useful and complementary imaging source. We also believe that the "key" application of terahertz technology is for T-ray imaging bio-body.

**Key words:** T-ray imaging,