

doi: 10.3788/lop47.023001

# 太赫兹波谱与成像

张存林<sup>1</sup> 牧凯军<sup>1,2</sup><sup>1</sup>首都师范大学太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048; <sup>2</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要** 主要介绍太赫兹技术的两大基本应用领域: 波谱技术与成像技术。总结了太赫兹波谱学中的时域光谱技术、时间分辨光谱技术和发射光谱技术以及相关的参数提取原理。介绍了太赫兹成像原理及相关的时域扫描成像、实时成像、层析成像、连续波成像和近场成像等太赫兹成像技术。列举了太赫兹光谱和成像技术在国家安全、生物研究、材料研究、无损检测等方面的应用。

**关键词** 波谱; 太赫兹; 成像; 时域光谱

中图分类号 TN247 OCIS 300.6495 110.6795 文献标识码 A

## Terahertz Spectroscopy and Imaging

Zhang Cunlin<sup>1</sup> Mu Kaijun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of THz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China  
<sup>2</sup>School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** The developments of terahertz (THz) spectroscopy and imaging technology in recent years are reviewed, including THz time-domain spectroscopy, time-resolved THz spectroscopy, THz emission spectroscopy, time-domain raster scan imaging, real-time imaging, tomographic imaging, continuous-wave imaging, and near-field imaging. Fundamental principles involved in THz spectroscopy and imaging techniques are introduced. Potential applications of THz technology, such as homeland security, biological research, materials research, non-destructive evaluation are discussed.

**Key words** spectroscopy; terahertz; imaging; time-domain spectroscopy

## 1 引言

太赫兹波(THz)是指频率在 0.1~10 THz(1 THz=10<sup>12</sup> Hz)之间的电磁波。该波段位于毫米波和红外之间,是宏观电子学向微观光子学过渡的重要区域。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。而在这之后的将近 20 年间,由于超快光学、半导体、电子学和微加工等科技的发展,太赫兹波的产生和探测技术也逐渐成熟,而太赫兹科学技术的两大基本应用——太赫兹光谱和太赫兹成像,将会在物理、生物、化学、国防、安检和航空航天等领域发挥重要的作用<sup>[1]</sup>。本文主要介绍这两大基本应用。

## 2 太赫兹光谱技术

太赫兹光谱技术能够提供分子的基本结构信息,太赫兹光谱包含了丰富的物理和化学信息,如许多轻分子的转动频率、大分子活官能团的振动模式和生物大分子的谐振频率都处在太赫兹波段。另外,太赫兹光谱也覆盖了电子材料的低能激励现象,凝聚态相位介质的低频振动模式,固体材料的声子、磁振

收稿日期: 2009-11-09; 收到修改稿日期: 2009-12-07

基金项目: 国家 973 计划(2007CB310408)和国家 863 计划资助课题。

作者简介: 张存林(1961—),男,博士,教授,主要从事太赫兹波谱与成像,太赫兹波与物质相互作用,太赫兹和红外热波无损检测等方面的研究。E-mail: cunlin\_zhang@mail.cnu.edu.cn



### 2.1.1 常规的样品光学常数提取原理

因为实验室中典型的太赫兹脉冲的峰值功率在微瓦量级，所以太赫兹弱电场和样品的相互作用是线性的。对于样品透射谱的光学常数提取是在真空近似(样品前后两侧的折射率均为 1)和弱吸收近似( $n \gg \kappa$ )的前提下，将实验测得的样品信号和参考信号的频域谱进行相比

$$E_{\text{sam}}(\omega) / E_{\text{ref}}(\omega) = T(\omega) \exp[-i\Delta\phi(\omega)], \quad (1)$$

式中  $E_{\text{sam}}(\omega)$  和  $E_{\text{ref}}(\omega)$  为频域中的复电场，分别表示样品信号和参考信号。 $T(\omega)$  为透过样品的太赫兹电场， $\Delta\phi(\omega)$  为相位变化。其中， $T(\omega)$  和  $\Delta\phi(\omega)$  可从实验中直接测得，由此可确定实折射率  $n(\omega)$ 、吸收系数  $\alpha(\omega)$  和消光系数  $\kappa(\omega)$

$$n(\omega) = 1 + \Delta\phi(\omega) \cdot \frac{c}{\omega d}, \quad \alpha(\omega) = \frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{T(\omega)[1+n(\omega)]^2} \right\}, \quad \kappa(\omega) = \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{T(\omega)[1+n(\omega)]^2} \right\} \frac{c}{\omega d}. \quad (2)$$

对于反射谱的情况，在太赫兹脉冲正入射或小角度入射的条件下，如果定义反射率  $r$  为反射光束  $E_2$  和入射光束  $E_1$  比值，则据此可求得

$$r(\omega) = \frac{E_2}{E_1} = \sqrt{R} \exp(i\phi), \quad r = \sqrt{R}. \quad (3)$$

式中  $E_1$  和  $E_2$  间的相位变化  $\Delta\phi$ ，反射率  $\sqrt{R}$  可从实验中测得，则折射率  $n$  和消光系数  $\kappa$  可通过

$$n = \frac{1+R}{1+R-2\sqrt{R}\cos\phi}, \quad \kappa = \frac{2\sqrt{R}\sin\phi}{1+R-2\sqrt{R}\cos\phi} \frac{c}{\omega}. \quad (4)$$

求出，而吸收系数  $\alpha = 4\pi\nu\kappa/c$ ， $\nu$  表示频率， $c$  表示光速。

### 2.1.2 不依赖参考光的参数提取方法

由于传统的光学参数提取方法需要分别测样品信号和参考信号，而且对波前的质量要求比较高，不太适用于远距离传输和大尺寸焦平面系统。另外，为了避免传统反射式测量系统测量参考信号和样品信号时反射面不能完全重合所造成的相位误差，所以又发展出了不依赖参考光的太赫兹透射谱和反射谱的提取材料吸收特征的方法。该方法不用太赫兹信号的振幅谱，仅是利用样品吸收特性的位相信息即可获得所需的参数。

对于透射式太赫兹时域光谱系统，由于弱极化的有机化合物对太赫兹波的吸收弱于对其散射，在适当的近似条件下，可利用折射率  $n(\omega)$  对频率的一阶导数  $-dn(\omega)/d\omega$  来标定样品的共振频率

$$-d\left(\frac{\phi_s(\omega)}{\omega}\right)/d\omega = -\frac{h}{c} dn(\omega)/d\omega. \quad (5)$$

由(5)式可知，频率分之相位对频率的一阶导数同样包含有材料的共振吸收频率特征<sup>[2]</sup>。

同样，对于反射式太赫兹时域系统，在忽略大气吸收的前提下，根据太赫兹反射脉冲相位  $\phi_s(\omega)$  对频率  $\omega$  的二阶导数与消光系数对频率  $\omega$  的二阶导数成线性关系得

$$\frac{d^2\phi_s}{d\omega^2} \approx \frac{2}{(n_\infty^2 - 1)} \frac{d^2\kappa}{d\omega^2}. \quad (6)$$

对于弱极性分子， $d^2\kappa/d\omega^2$  与  $\kappa$  具有相同的曲线形状(只是正负相反)。因此利用样品信号相位的二阶导数  $d^2\phi_s/d\omega^2$  可完全表征化合物分子共振频率的吸收特性<sup>[3]</sup>。

## 2.2 时间分辨太赫兹光谱技术

时间分辨太赫兹光谱技术为光抽运-太赫兹波探测的光谱技术,是光学抽运技术和太赫兹时域光谱技术结合的一种非接触式的电场探测技术。通过该技术可以直观地观测到样品信号的光致变化所反映出的信息,其分辨率在亚皮秒量级(最高可达 200 fs)。相对于太赫兹时域光谱技术,时间分辨的太赫兹光谱技术更加复杂,前者所测得的信息为样品的静态特性,而后者能测得物质的动态变化信息。

时间分辨的太赫兹光谱系统利用同步产生的红外抽运脉冲和太赫兹探测脉冲实现测量,如图 2 所示。当样品被激励之后,随即被太赫兹脉冲探测。通过改变抽运脉冲和探测脉冲之间的时间延迟,可实验测得多种动态过程,如载流子注入、冷却、衰变和捕获等。该种光谱系统主要有太赫兹产生支路、探测支路和可见光抽运支路。当可见光脉冲激励样品之后,样品的介电常数会发生改变,利用时间分辨的太赫兹光谱技术可用来研究这种变化。介电常数的改变通常是由光生自由载流子和极化子等现象导致的。该技术是研究纳米材料电特性的重要手段,因为传统的探测技术很难实现非接触的电特性探测。

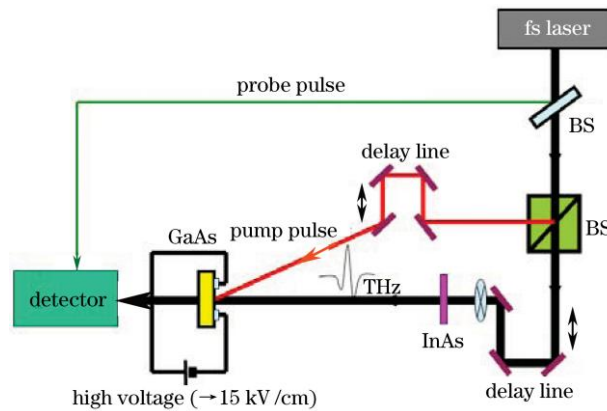


图 2 时间分辨的太赫兹光谱系统  
Fig.2 Time-resolved THz spectroscopy system

时间分辨的太赫兹光谱系统可直接测量出光电导率的光致变化,而光电导率可反映出材料内部载流子浓度及其迁移率的信息。复光电导率  $\sigma$  可从材料的复介电常数直接求得

$$\sigma' = \varepsilon_0 \omega (\eta'' - \varepsilon''), \quad \sigma'' = \varepsilon_0 \omega (\varepsilon' - \eta'), \quad (7)$$

式中  $\eta$  为光激励介电常数,  $\varepsilon$  为非光激励情况下的静态介电常数,  $\varepsilon_0$  为自由空间的介电常数,  $\omega$  为角频率。

## 2.3 太赫兹发射光谱技术

太赫兹发射光谱技术是通过分析材料辐射出的太赫兹波形的振幅和形状,以此研究材料的特性。太赫兹发射光谱系统实质是太赫兹时域光谱系统的简单变形,只不过它所研究的样品为系统自身的太赫兹发射极。利用太赫兹发射光谱技术可对半导体、超导体、异质结构(量子阱、超晶格等)、溶剂中的定向分子和磁膜等材料进行研究。

当样品被光激励后产生光生电流或光生极化作用(电极化或磁极化)而辐射出太赫兹脉冲,根据辐射出的太赫兹波形可分析背后机理过程的动力学。太赫兹发射光谱系统与太赫兹时域光谱系统和时间分辨太赫兹光谱系统的不同之处在于,不管先期的光激励存在与否,太赫兹探测脉冲并不是用来探测样品的太赫兹光学特性的。典型的太赫兹发射光谱系统如图 3 所示。飞秒激光源发出的飞秒脉冲被分为抽运光和探测光。其中,飞秒脉冲 99.9% 的能量用于激励样品。而探测光束需经过垂直起偏器,而后根据自由空间电光取样技术去探测电磁瞬变<sup>[4]</sup>。

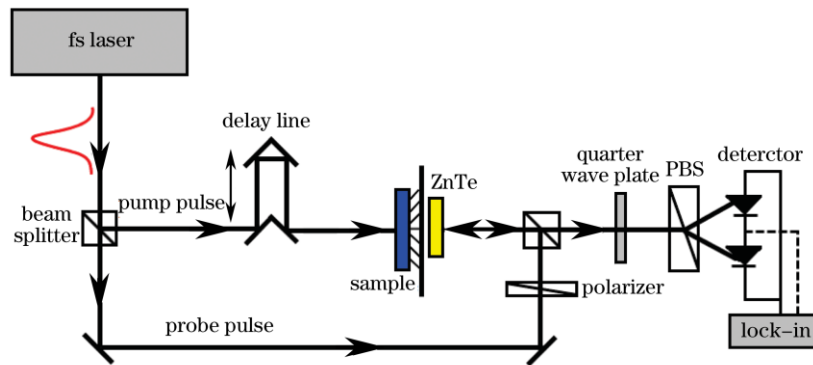


图 3 太赫兹发射光谱系统  
Fig.3 THz emission spectroscopy

以上 3 种光谱技术都是基于超快光学产生相干太赫兹脉冲技术之上, 是宽带线性光谱探测技术。随着太赫兹相关技术的进步, 高宽带、强太赫兹(太赫兹电场能达千伏每厘米量级)波辐射可以实现非线性光谱的测量。太赫兹非线性光谱可用于研究晶格非简谐振动、晶格动力学的相干控制、液体和无序体系的低频运动及半导体的非线性电响应等。另外, 基于电子学的高光谱分辨率的窄带太赫兹光谱系统也可以用来研究声子共振、相变、超导体和电荷转移等, 与基于光学技术的宽带太赫兹光谱技术形成互补。

### 3 太赫兹成像

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性、无损性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。

1995 年, Hu 等在 THz-TDS 系统中增加二维扫描平移台, 首次实现脉冲太赫兹时域光谱成像, 并成功对树叶、芯片等样品成像。由于这种成像方法获得的是样品的光谱信息, 不仅能够实现结构成像, 而且能够实现功能成像。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电光取样成像、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, 可应用于生物医学、质量检测、安全检查、无损检测等众多应用领域。

#### 3.1 太赫兹成像的基本原理

利用太赫兹成像系统把成像样品的透射谱或反射谱的信息(包括振幅和相位的二维信息)进行处理、分析, 得到样品的太赫兹图像。太赫兹成像系统的基本构成与太赫兹时域光谱相比, 多了图像处理装置和扫描控制装置。利用反射扫描或透射扫描都可以成像, 这主要取决于成像样品及成像系统的性质。根据不同的需要, 可以采用不同的成像方法。

对于太赫兹时域光谱成像系统, 它所获取的数据集合实际是三维时空的数据(二维空间  $(x, y)$  轴向和一维时间轴向)。利用该三维数据集合可得到一系列样品的太赫兹图像, 即皮秒量级的电影。另外由于在一个时间点上的太赫兹图像所包含的信息量很少, 所以通常要获取整个三维的数据集合。而太赫兹图像的重构通常就是基于太赫兹时域波形的特定参数或峰位的延迟时间。

目前对于样品重构的方法主要有以下 5 种:

1) 飞行时间成像: 利用各像素点对 THz 信号的时间延迟信息成像, 如图 4(a)中的  $a, b, c$  和  $d$  所示。其中,  $b$  为最大峰值时间成像, 该成像方法反映了太赫兹在样品的折射率。

2) 时域最大值、最小值、峰值成像: 利用各像素点 THz 时域信号的最大值、最小值或最大值与最小值的差值成像, 分别如图 4(a)中的  $A, B, C$  所示。其中, 时域最大值成像反映了样品对太赫兹波的消光系数。



3) 特定频率振幅(相位)成像: 利用各像素点 THz 频域信号在某一频率的振幅(相位)值成像, 如图 4(b)中的  $E$  所示。

4) 功率谱成像: 对各像素点 THz 频域信号在某一段频率范围内的振幅平方值积分的信息成像, 如图 4(a)中的  $D$  所示。

5) 脉宽成像: 利用太赫兹主峰值的脉宽成像, 如图 4(a)中的  $f$  所示。该成像模型主要反映物体的色散特性, 它可以清晰地呈现物体的轮廓。

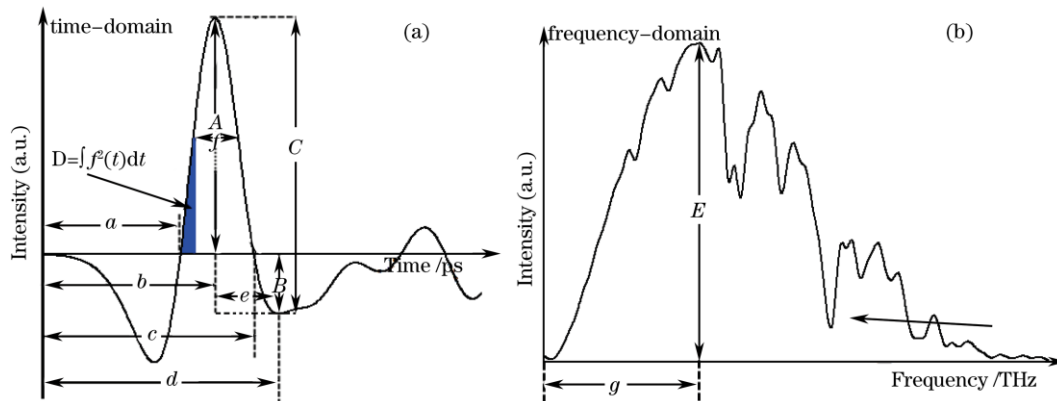


图 4 太赫兹成像的重构方法。(a)时域成像; (b)频域成像  
Fig.4 THz imaging reconstruction. (a) time domain signal; (b) FFT signal

### 3.2 太赫兹时域逐点扫描成像

太赫兹时域光谱成像系统与许多远红外系统不同, 它可以摆脱低温的限制, 并且太赫兹脉冲在亚皮秒量级, 对位相探测十分敏感。

太赫兹脉冲时域光谱成像技术与一般的强度成像不同, 它的一个显著特点是信息量大。每一个像素点对应一个时域波形, 可以从时域信号及傅里叶变换频谱中选择任意一个数据点的振幅或相位进行成像, 从而重构样品的空间密度分布、折射率和厚度分布。并且由于太赫兹脉冲对大多数非极性电解质材料(塑料、陶瓷、纸张、衣物等)具有良好的穿透性, 而炸药、毒品、病毒等危险品在太赫兹波段存在特征吸收峰, 因此这一技术具有探测并识别隐蔽物体的能力。

太赫兹逐点扫描成像系统就是在 THz-TDS 系统中将样品放置在二维扫描平移台, 样品可以在垂直于太赫兹波传输方向的  $x$ - $y$  平面移动, 从而使太赫兹射线通过样品的不同点, 记录样品不同位置的透射和反射信息, 实现对样品上每一个像素点提取太赫兹时域波形, 利用各个点的样品信息实现物体重构<sup>[5]</sup>。以葵花籽逐点扫描成像为例, 图 5 中列举了 3 种太赫兹时域逐点扫描成像处理结果。其中, 图 5(a)为飞行时间成像, 图 5(b)为时域最大值成像, 图 5(c)为频域最大值成像。实验装置可参看图 1(a)。

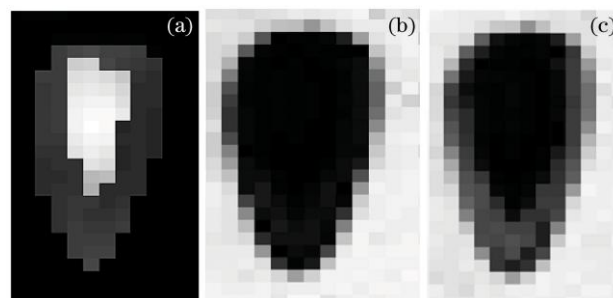


图 5 葵花籽太赫兹逐点扫描成像。(a)飞行时间成像; (b)时域最大值成像; (c)频域最大值成像  
Fig.5 THz raster scan imaging of a sunflower seed. (a) time of flight mode; (b) maximum-signal mode; (c) FFT maximum mode

太赫兹时域光谱二维逐点扫描成像适用于高精度测量。该方法测量结果分辨率高, 受背景噪声的干扰

小, 信噪比高(可达  $10^4$ )。但同时它也存在一些问题, 如扫描时间过长, 成像时间取决于像素点的多少, 成一幅像需要几十分钟甚至几个小时, 所以要提高成像速度必须改进方法。另外, 该方法也不适合用于大样品的成像, 不能对动态变化的信息进行测量和监控。

### 3.3 太赫兹实时焦平面成像

太赫兹实时成像技术可以克服成像时间过长的缺点。样品被放在一个  $4f$  成像系统当中, 而后利用大尺寸的 ZnTe 晶体和 CCD 像机作为接收装置, 由此无需对样品进行二维扫描就能直接获取整个样品的光谱信息, 因而可克服逐点扫描时间过长的缺点, 如图 6 所示, 该装置为反射式太赫兹实时成像系统的一种。

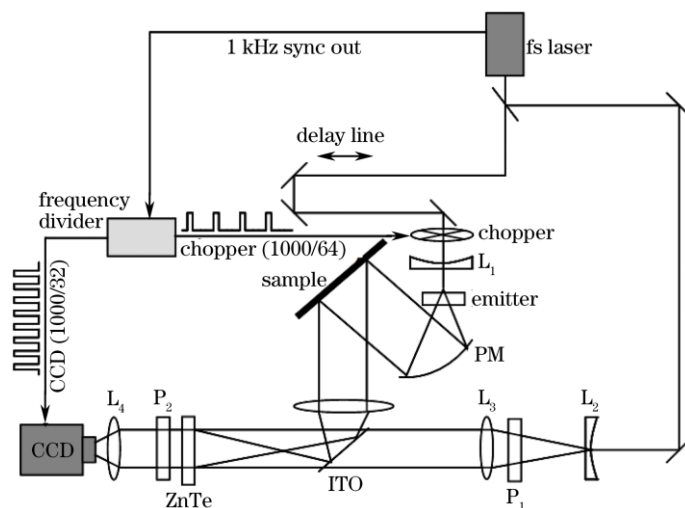


图 6 太赫兹实时焦平面成像系统  
Fig.6 THz real-time focal plane imaging system

实验中太赫兹脉冲在样品表面的入射角度为  $15^\circ$ 。焦距为 150 mm 的聚乙烯透镜将物体成像在大尺寸的 ZnTe 探测晶体(40 mm×40 mm×2 mm) 上。探测光束被扩束为直径 25 mm(大于太赫兹脉冲直径), 与太赫兹脉冲共线通过探测晶体。捕获图像使用的是 CCD 像机(系统中的曝光时间为 32 ms)。系统的信噪比大于 200, 图像的空间分辨率为 2 mm。当探测光束透过一对相互垂直的起偏器、检偏器后, 电光晶体中的太赫兹二维电场分布就转化为探测光的二维光强分布, 于是太赫兹图像间接地被 CCD 像机记录。

此系统不但可以对样品进行一次成像, 而且可以对样品进行实时监控, 它没有数据采集上的限制, 理论上可以实时采集, 但是由于 CCD 的响应速度的限制, 高灵敏度的 CCD 的响应速度可达到 70 f/s。尽管此法的信噪比较小, 但如果与单脉冲太赫兹成像相结合, 将非常有前景。另外, 在实际的实验当中, 由于实时成像系统不能利用锁相放大器降噪, 所以需要成出几十甚至上千幅太赫兹图像而后求平均降噪(成像的幅数根据需要而定)。

实时二维太赫兹成像技术利用 CCD 像机间接读出太赫兹信号, 获得对样品的太赫兹图像。利用该方法可对运动物体或活体进行成像, 另外该技术在国土安全领域也具有很大的应用前景, 可以探测隐蔽的危险物品或人物, 如图 7 所示, 它是对塑料玩具手枪进行了太赫兹实时成像<sup>[6]</sup>。

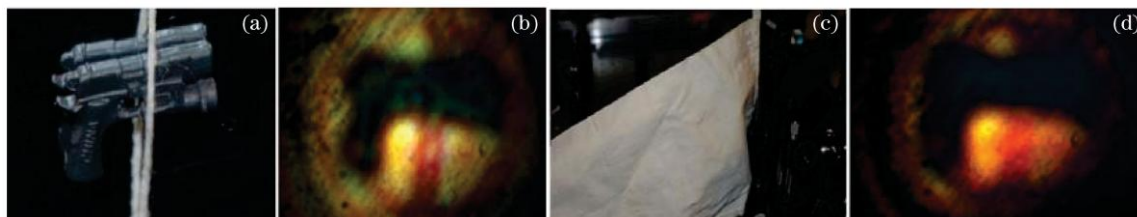


图 7 (a)塑料玩具手枪的光学照片; (b)THz 图像; (c)覆盖帆布的实物照片; (d)可以清晰辨认隐匿物体的 THz 图像

Fig.7 (a) Optic image of a plastic toy gun; (b) its THz image; (c) optic image of the toy gun covered by canvas; (d) THz image of the toy gun covered by canvas

### 3.4 太赫兹波计算机辅助层析

太赫兹波计算机辅助层析成像(T-CT)是一种新型的成像形式,采用太赫兹脉冲和新的重构计算方法。该技术能够描绘被测物的三维结构。T-CT系统从多个投影角度直接测量宽波段太赫兹脉冲的振幅和相位,而后通过图像重构算法从被测样品中提取大量的信息,包括三维结构和与频率有关的太赫兹光学性质。

每一步CT扫描会发射一个平面波,而后会在一个二维平面内记录下透过样品或被样品反射回来的一系列的波形。重复这样的CT扫描,并改变扫描的角度 $\theta$ ,就会得到多幅太赫兹二维图像。假设所接收的信号为直接路径的线积分,则傅里叶投影理论可在此应用。在随后的太赫兹图像重构的过程当中,根据实验测量所得样品的特征参数而后利用滤波反投影算法或其他算法就可重构出整个物体的太赫兹层析图像。其中,太赫兹脉冲的振幅和峰值的时间延迟是重构算法所用的重要参数。重构的振幅图像可反映出样品在太赫兹波段吸收的三维情况,而重构的时间图像则可反映出样品折射率的三维分布。

图8是利用连续太赫兹波对空心泡沫球所进行的三维层析成像。球的直径为40 mm,侧面中央部位有一不规则的洞口,球的底部有一固定螺丝。实验时太赫兹源(耿氏振荡器)和探测器(肖特基二极管)固定不动,样品被置于旋转台上。旋转台每旋转2°就对样品成一幅投影,因此一周共得到90个投影像。每个投影的分辨率为1004 pixel×754 pixel,将这90幅投影作为空间投影函数,而后对其进行逆Radon变换就可得到样品的空间分布函数。

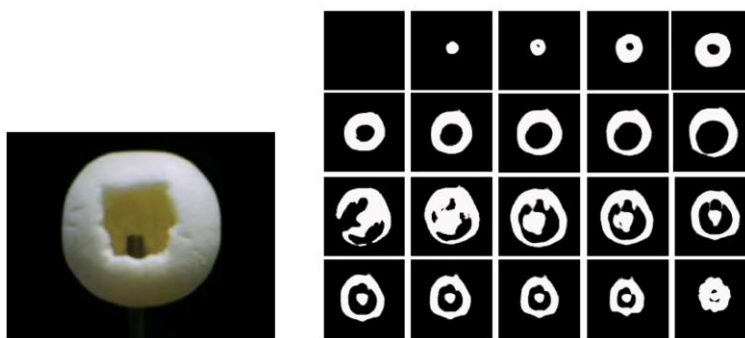


图8 T-CT对泡沫球样品的部分层析断层图像(水平切面)  
Fig.8 THz CT image of a foam ball with hollowed center

上述层析成像所用的太赫兹源为连续太赫兹波源,在实际的实验中也可以换成脉冲宽带太赫兹波源。另外,如果物体的不均匀尺度与成像波长相近时,则光束的衍射效应必须予以考虑,直接的线积分在这种情况下就不太适用,由此需要对物体进行衍射层析成像。这种情况在太赫兹层析成像中经常发生,这是因为太赫兹波长为亚毫米量级与许多目标物的特征尺寸相近。

### 3.5 连续波成像

和迅速发展的太赫兹脉冲成像一样,太赫兹连续波成像也引起了人们的注意。太赫兹连续波成像系统可以提供相对于脉冲成像系统更好的空间分辨率和成像质量。

太赫兹连续波成像技术的发展在很大程度上会受到太赫兹连续源和探测器发展的影响。但是太赫兹连续波成像通常是非相干成像,这是因为大多数太赫兹连续波源都是非相干性的。在太赫兹连续波成像系统中,也通常是利用非相干探测器或探测阵列来直接成像的。

太赫兹连续波成像和太赫兹脉冲成像相比,具有以下优势:光谱功率高、系统集成度高、体积小、成本相对较低、成像速度快。图9为首都师范大学太赫兹实验室的太赫兹连续波成像系统示意图。图中的连续波源为返波管或耿氏管,探测器为热释电探测器、高莱探测器或肖特基二极管。样品被置于一个二维平移台上,通过计算机控制平移台,可实现对样品的二维成像。另外,肖特基二极管的动态范围高于热释电探测器,大致与高莱探测器相当,但是它的响应速度却是三者中最快的,所以可以进行高速成像。由此可



将耿氏管和肖特基二极管集成为一个太赫兹单元，如图 9 虚线框中所示，既缩小了系统尺寸，又可进行高速反射式成像。

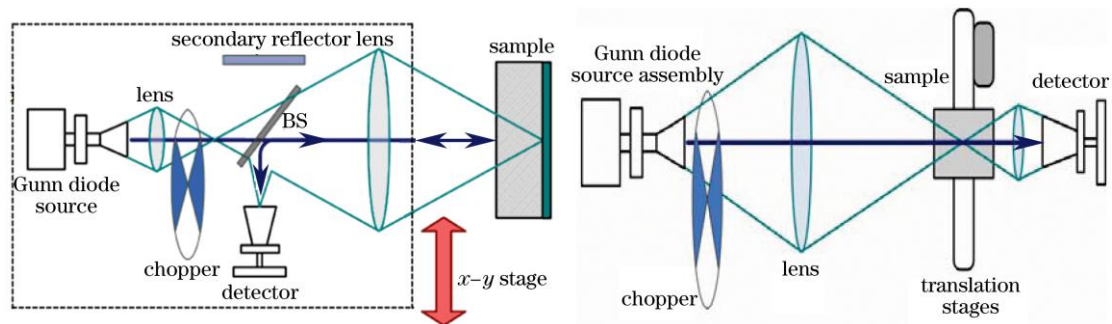


图 9 太赫兹连续波成像系统  
Fig.9 CW THz imaging system

返波管和耿氏管的发射功率都在毫瓦量级，功率相对较高，可以进行一些透射、反射甚至远距离成像。利用太赫兹连续波成像系统可以快速进行相关的安全检查、无损探伤、质量检测、雷达扫描等应用，如图 10 所示。图 10 中(c)为(a)的成像结果，是返波管的透射测量结果。成像目标为装在信封中(7.3 cm×6.3 cm)的硬币、曲别针和用铅笔写的字母“THz”；(d)为(b)的成像结果，是耿氏管的反射远距离(25 m)测量结果，成像目标为一架波音客机模型。

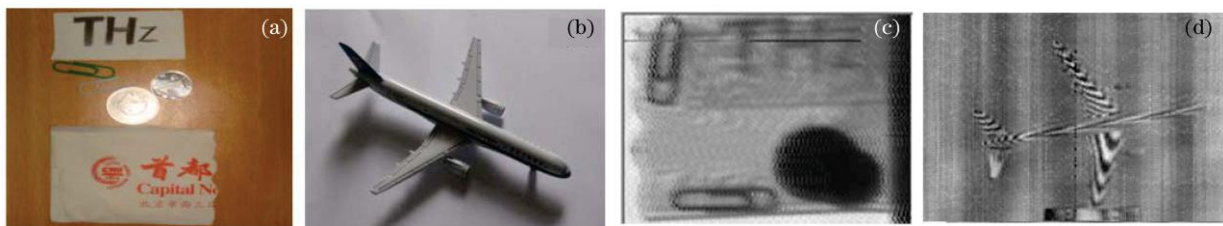


图 10 信封内隐蔽物体(a)和飞机模型(b)及它们的太赫兹连续波成像结果(c)(d)

Fig.10 (a) Optic image of an envelop with hidden contents;(b) optic image of an aluminum toy airplane; (c) CW THz image of the envelop; (d) CW THz image of the toy plane

### 3.6 近场成像

由瑞利判据可知，太赫兹成像技术存在空间分辨率不足的限制，由此限制了太赫兹成像技术的实用化，所以需要突破衍射极限，提高太赫兹成像系统的空间分辨率。如果太赫兹成像系统能够在收集传输波的同时还能采集到瞬逝波，则就能获得亚波长量级的分辨率。另外，由于瞬逝波仅存在于成像样品的表面附近，它会随距离的增加而指数递减，无法抵达像平面，所以如果将探测器放置于样品附近(一个波长之内)，就可探测到瞬逝波，由此就可对样品进行亚波长高分辨率的成像，此即为近场成像技术。

太赫兹近场成像最早实现于 1998 年，此后太赫兹近场成像技术得到了迅速的发展。目前太赫兹近场成像技术主要有基于亚波长孔径的近场成像、基于探针(tip)技术的近场成像和基于高度聚焦光束的近场成像 3 种。图 11(a)为太赫兹近场焦平面实时成像系统，该系统将太赫兹焦平面技术和近场成像技术结合在一起，提高了实时成像技术的分辨率。探测晶体 ZnTe 与被成像样品(金属板)紧贴着放置在一起，以使它们间的距离控制在一个波长范围内。其中，成像金属板的孔阵列的相关参数都在亚波长量级，如图 11(b)所示。在其太赫兹近场成像结果图 11(c)中可以清晰地看到所有的圆孔和方孔<sup>[7]</sup>。

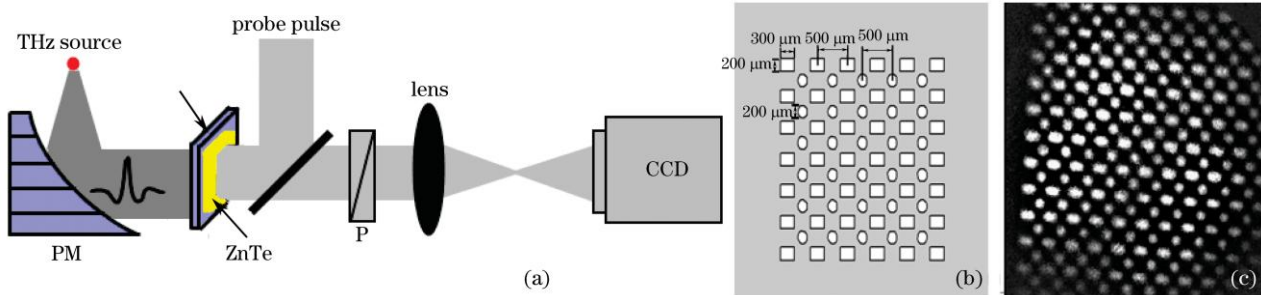


图 11 太赫兹焦平面近场成像。(a)成像装置示意图；(b)成像样品示意图；(c)成像结果  
Fig.11 THz focal plane near field imaging. (a) schematic diagram of the imaging system; (b) schematic illustration of the sample; (c) imaging result

## 4 太赫兹光谱技术和成像技术的应用

太赫兹光谱和成像技术是两种全新的探测、识别和研究工具，它们在安全领域、材料研究、生物、化学等自然学科以及无损检测等方面具有广泛的应用前景。

### 4.1 太赫兹在安全领域中的应用

太赫兹光谱技术和成像技术可以在安全领域中发挥巨大的作用，可用来监控、探测和识别致命性药剂如炸药、生化战剂和病毒等。这对于国土安全、机场和车站安检等领域具有重要意义。

由于大多违禁物品或危险品在太赫兹波段都有指纹谱，利用太赫兹光谱或成像技术可以轻易地检测出它们。首都师范大学<sup>[8~11]</sup>已经系统地对典型的爆炸物和毒品进行了研究，实验测得了 10 种爆炸物和 38 种毒品在太赫兹波段的指纹谱，部分样品的指纹谱如图 12 所示。从图中可以清楚地看到，这些爆炸物或毒品在所研究的太赫兹波段都有明显的特征吸收峰。根据这些特征吸收峰还可以鉴别出爆炸物或毒品的种类。另外，由于太赫兹波辐射的低能无损性，可以利用太赫兹技术进行活体检测，可有效对人体炸弹或人体携带的毒品或其他违禁物进行检测、预警等。

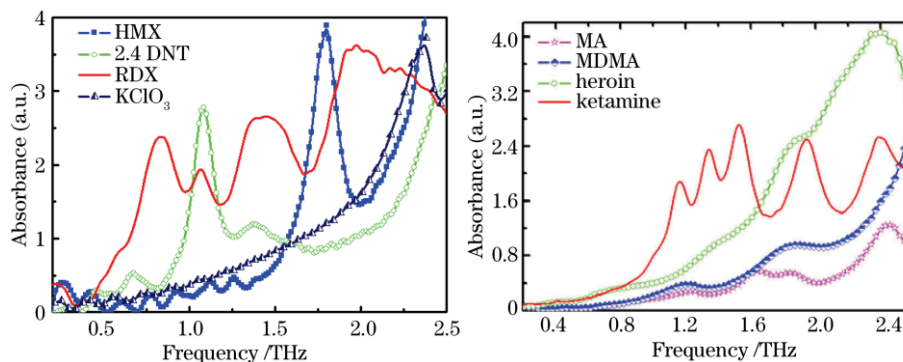


图 12 违禁物品检测。(a)爆炸物检测；(b)毒品检测  
Fig.12 Inspection of contraband articles. (a)explosive material; (b) illicit drug

现有的金属探测器和 X 光安检等设备无法识别陶瓷刀具、塑料炸药等新型作案工具或武器。但这些材料在太赫兹波段的透明度不如在 X 光波段，而且太赫兹光谱技术可以容易测得样品的折射率，因此利用太赫兹光谱或成像技术可以有效地对它们进行成像鉴别或光谱测量识别。另外，由于大多包装材料在太赫兹波段都有很高的透过率，所以太赫兹技术可以对包裹、信封以及其他包装物内的隐蔽物品进行排查，甚至太赫兹波辐射还有可能穿透沙土探测埋在地雷等，如图 13 所示。



图 13 纸盒中刀具的太赫兹透射成像

Fig.13 Transmission THz imaging of a knife concealed in a cardboard box

#### 4.2 太赫兹在材料研究中的应用

利用太赫兹超快光谱技术(光抽运-太赫兹探测)能够探测电子运动和核运动等超快运动的时间分辨率,在化学、生物、物理等方面具有很大的应用前景。在材料研究领域,时间分辨率的超快光谱技术可以研究半导体内部的电子运动,如电子间的碰撞、散射以及电子与声子的碰撞、散射,电子迁移等效应。

利用时间分辨的太赫兹光谱技术可以研究半导体材料,如硅片(Si)、砷化镓(GaAs)等的超快载流子动力学,如图 14 所示。图中所示的为 0.5 mm 晶向为  $\langle 110 \rangle$  GaAs 在未加外置偏压电场的情况下,不同抽运能量所对应的抽运探测一维扫描的结果。其中,纵坐标中  $T_0$  为受光激励的太赫兹峰值透过率,  $\Delta T$  为受光激励后峰值透过率与  $T_0$  的差值,而横坐标的延迟时间为光抽运路和太赫兹产生路之间的时间延迟。插图表示未加电场时载流子弛豫时间与抽运光能量的关系。从图中可以看出抽运光能量越大,太赫兹透过率越小。但是抽运光能量却与载流子浓度的关系几乎成线性,即抽运光能量越大,光生载流子的浓度越大。而后随着时间延迟的增加,光生载流子会迅速复合,其浓度会相应减小<sup>[12]</sup>。

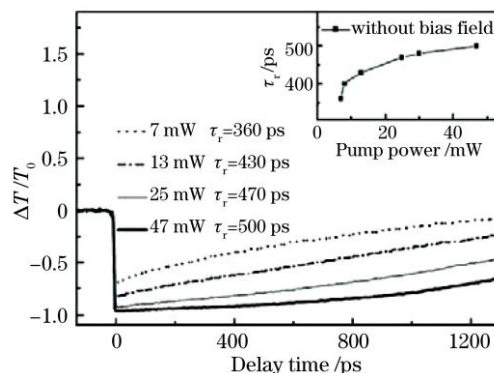


图 14 不同抽运能量下太赫兹的传输情况(未外加电场)

Fig.14 THz transmission under different pump power without bias field

如果考虑抽运光功率不变,对样品施加一个外置偏压,则该电场可对太赫兹信号进行调制。外加电场较小时,太赫兹信号受外置偏压影响不明显;但当外置偏压达到一定的阈值(耿氏临界值,约为 3~4 kV/cm)之后,砷化镓样品会发生能谷间散射,致使表面载流子的迁移率下降,进而影响到样品对太赫兹波的吸收,太赫兹信号会随之得到增强,如图 15 所示。图中为太赫兹峰值位置处外置偏压分别为 0, 6 和 15 kV/cm 情况下的一维扫描结果。从图中可以看出当演示时间为负值的情况下,即抽运光落后于太赫兹脉冲到达样品表面,这样无法形成抽运探测现象,外加电场对太赫兹峰值没有影响。但是当演示时间为 0 时,即抽运探测现象出现时,外置偏压对太赫兹峰值开始有调制作用。图中插图表示延迟时间为 40 ps 时,外置偏压较小的情况下,太赫兹峰值信号未受外置偏压的调制影响而明显变化<sup>[13]</sup>。



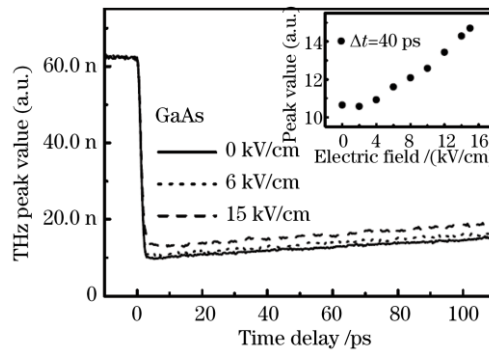


图 15 不同外置偏压下太赫兹峰值的变化(抽运能量固定)

Fig.15 THz peak amplitude at different bias voltages with the same pump power

太赫兹波不仅可以用于研究天然材料，而且对于特异性材料的研究也具有积极作用。现在，太赫兹波与特异性材料的相互作用已经成为太赫兹研究领域的热点之一。

#### 4.3 太赫兹在生物研究方面的应用

光谱分析在生物学领域是一种不可或缺的研究手段，太赫兹光谱分析可在生物分析领域发挥巨大的作用。太赫兹光谱技术可用于蛋白质指纹谱的获取、分子反应的无标记测量、无标记生物芯片读出以及生物分子在实现其相应生理功能时所发生的构型和构像变化的探测。太赫兹成像技术则可以实现功能性成像、细胞分辨水平的成像、辨别癌细胞、药物外层腹膜研究等。

生物分子对太赫兹辐射的响应主要表现为分子的集体振动模式，该模式主要是由分子的构型和构像所决定，它可反应出分子的整体结构信息，通过集体振动模式的分布和强度还可分析其周围的环境。所以太赫兹技术在研究生物大分子的结构、分子间的反应和分子与周围环境的相互作用具有独特的优势。另外，利用时间分辨的光谱技术可以对蛋白质等易变形的大分子在特定的生理过程或其他相互作用过程中发生的构像变化等过程进行动态分析。

组成肽、蛋白质的基本单位氨基酸在太赫兹波段具有显著的太赫兹特征吸收峰<sup>[14]</sup>，首都师范大学太赫兹实验室对 20 种氨基酸的太赫兹光谱进行了研究，得到了它们的太赫兹光谱，并建立了相应的光谱数据库。部分氨基酸的太赫兹光谱如图 16 所示。结果表明，各种氨基酸对太赫兹波具有灵敏的光谱相应，在有效的光谱测量范围，它们均有特征吸收峰，而且各个光谱之间具有明显的差异，由此利用太赫兹光谱能够有效地区分不同种类的太赫兹光谱。利用太赫兹光谱技术研究氨基酸体系对于研究生物肽直至蛋白质大分子的理论和应用研究具有重要的科学和应用意义。另外，太赫兹光谱技术对于中药和生物选种的研究也具有积极的作用。利用太赫兹光谱技术可以进行中药和生物种子品种的鉴定和品质的评价，为促进中医药科学和农业发展提供有效的研究途径。

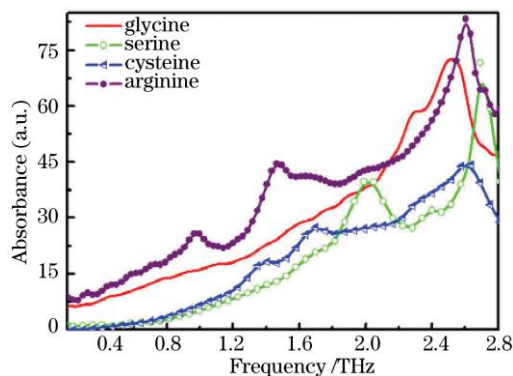


图 16 部分氨基酸的太赫兹光谱

Fig.16 THz absorption spectra of some amino acids



#### 4.4 太赫兹在无损检测领域的应用

太赫兹无损检测已经被列为 NASA 的四大常规检测技术之一。太赫兹成像检测或光谱检测技术在航天飞机机体疲劳检测、隐患排查, 复合树脂、陶瓷、塑料、自然材料和其他非金属材料的检测, 汽车仪表盘、建筑物内的墙后和地板材料表面检测, 印刷电路板的脱层问题、密封性检测、瓷砖和纸张等的生产检测领域具有广泛的应用前景。

航天泡沫材料、吸波涂层、玻璃钢等航天材料在太赫兹波段的透明度很高, 利用太赫兹无损检测技术可以探测这些材料缺陷, 为航天器的安全飞行提供保障, 如图 17 所示。其中, 图 17(a)为火箭燃料箱泡沫板内的缺陷的太赫兹成像, 图中的 4 个缺陷是用锡箔纸做的人工缺陷, 从泡沫板的太赫兹图像中可以清晰地看出 4 个缺陷的边缘以及缺陷的凸起和凹陷; 图 17(b)为碳纤维基板和吸波层间所预埋的缺陷, 样品中预埋了 12 个大小不同的缺陷, 在太赫兹图像中均可清晰地分辨出它们的位置和形状; 图 17(c)为铝板和漆层间预埋的人工缺陷聚四氟乙烯, 太赫兹波穿透了防护漆层对所有缺陷的大小和位置进行清晰地成像。因为太赫兹不能透过铝板和碳纤维, 这里所做的成像都是反射式连续波成像, 即太赫兹波透过泡沫(涂层)朝向铝板(碳纤维板)入射。

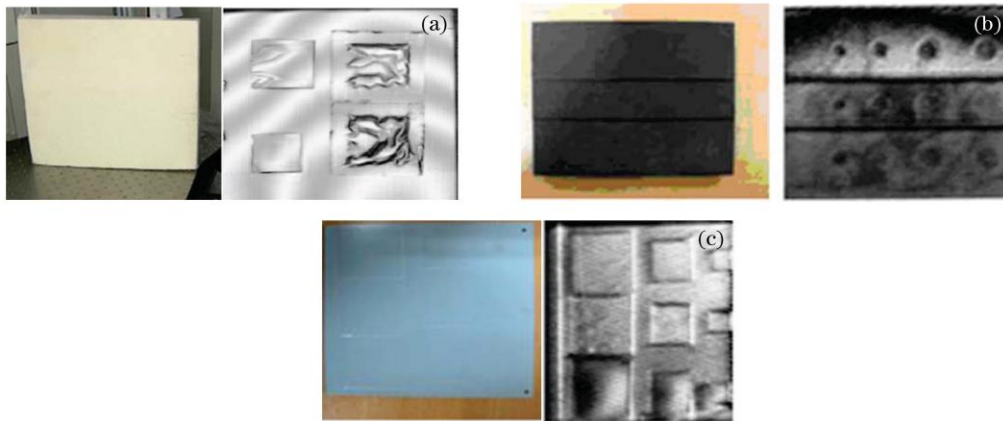


图 17 太赫兹无损检测。(a)铝板和航天泡沫材料之间的人工缺陷;(b)碳纤维基板和吸波涂层之间的缺陷;  
(c)铝板和漆层之间的缺陷

Fig.17 THz nondestructive inspection. (a) manmade defects buried on aluminum substrate covered by aerospace material;  
(b) manmade defects predisposed between carbon fiber board and infrared absorptive material;  
(c) manmade defects placed on aluminum board covered by paint

## 5 结 论

总结了太赫兹时域光谱技术、时间分辨的太赫兹光谱技术和太赫兹发射光谱技术, 并相应介绍了前 2 种光谱技术的参数提取原理。介绍了太赫兹各种成像技术的定义和技术, 给出了相应的成像结果。介绍了太赫兹光谱技术和成像技术在安全领域、材料研究、生物研究和无损检测领域中的应用, 可看出太赫兹光谱技术和成像技术在许多领域具有重要的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Cunlin. Terahertz Sensing and Imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 96~234  
张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 96~234
- 2 Liangliang Zhang, Hua Zhong, Chao Deng *et al.*. Terahertz wave reference-free phase imaging for identification of explosives[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(9):091117
- 3 Hua Zhong, Cunlin Zhang, Liangliang Zhang *et al.*. A phase feature extraction technique for terahertz reflection spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(22):221106

- 4 Susan L. Dexheimer. Terahertz Spectroscopy Principles and Applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2007
- 5 Zhang Zhenwei, Cui Weili, Zhang Yan *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy imaging[J]. *J. Infrar. Mill. 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
- 6 Liangliang Zhang, Nick Karpowicz, Cunlin Zhang *et al.*. Real-time nondestructive imaging with THz waves[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(6): 1473~1475
- 7 Yan Zhang, Xinke Wang, Ye Cui *et al.*. THz quasi-near field focal plane imaging[C]. IRMMW-THz, 2009. F1C03.0041
- 8 Qingli Zhou, Cunlin Zhang, Kaijun Mu *et al.*. Optical property and spectroscopy studies on the explosive 2,4,6-trinitro-1,3,5-trihydroxybenzene in the terahertz range[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(10): 101106
- 9 Lantao Guo, Yng Hu, Yan Zhang *et al.*. Vibrational spectrum of  $\gamma$ -HNIW investigated using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3654~3659
- 10 Li Ning, Shen Jingling, Sun Jinhai *et al.*. Study on the terahertz spectrum of methamphetamines[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(18): 6750~6755
- 11 Guangqin Wang, Jingling Shen, Yan Jia. Vibrational spectra of ketamine hydrochloride and 3, 4-methylenedioxymethamphetamine in terahertz range[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(1): 013106
- 12 Yulei Shi, Qingli Zhou, Cunlin Zhang *et al.*. Ultrafast high-field carrier transport in GaAs measured by femtosecond pump-terahertz probe spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(12): 121115
- 13 Qingli Zhou, Yulei Shi, Bin Jin *et al.*. Ultrafast carrier dynamics and terahertz conductivity of photoexcited GaAs under electric field[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(10): 102103
- 14 W. N. Wang, W. W. Yue, H. T. Yan. THz time-domain spectroscopy of amino acids[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2005, **50**(15): 1561~1565