

# THz 技术的应用及展望\*

王少宏<sup>1</sup> 许景周<sup>1</sup> 汪力<sup>2</sup> 张希成<sup>1</sup>

(1 美国伦斯勒理工学院物理系 特洛伊 NY 12180)

(2 中国科学院物理研究所光物理开放实验室 北京 100080)

**摘要** 自 20 世纪 80 年代中期以来, THz 辐射的研究取得了重要的进展. 文章介绍和讨论了以 THz 辐射为探测光源的时域光谱测量在基础物理、信息材料、化学和生物材料研究中的应用, 以及 THz 成像和 THz“雷达”技术在材料研究、安全检查和生物医学等领域的应用前景.

**关键词** THz 辐射, 时域光谱, 成像

## APPLICATIONS AND PROSPECTS OF TERAHERTZ TECHNOLOGY

WANG Shao-Hong<sup>1</sup> XU Jing-Zhou<sup>1</sup> WANG Li<sup>2</sup> ZHANG Xi-Cheng<sup>1</sup>

(1 Department of Physics, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180)

(2 Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** Remarkable progress in research on terahertz (THz) radiation has been achieved since the mid-80's. We review the applications of time-domain spectroscopy with THz radiation as the probe source in basic physics, information materials science, chemistry and biology, along with the prospects of THz imaging and THz radar applied to materials research, security inspection and biomedicine.

**Key words** THz radiation, time-domain spectroscopy, imaging

THz 辐射通常指的是波长在 1 mm—100 μm (300 GHz—3 THz) 区间的远红外电磁辐射, 其波段位于微波和红外光之间. 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, 科学家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. 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<sup>[1]</sup>. THz 技术之所以引起广泛的关注, 首先是由于该波段电磁波的重要性. 物质的 THz 光谱(包括发射、反射和透射)包含有丰富的物理和化学信息, 研究材料在这一波段的光谱对于物质结构的探索具有重要意义. 其次, THz 脉冲光源与传统光源相比具有很多独特的性质, 其中包括:

(1) 瞬态性: THz 脉冲的典型脉宽在皮秒量级, 不但可以方便地进行时间分辨的研究, 而且通过取样测量技术, 能够有效地抑制背景辐射噪音的干扰. 目前, 辐射强度测量的信噪比可大于  $10^0$ .

(2) 宽带性: THz 脉冲源通常只包含若干个周期的电磁振荡, 单个脉冲的频带可以覆盖从 GHz 至几十 THz 的范围.

(3) 相干性: THz 的相干性源于其产生机制. 它是由相干电流驱动的偶极子振荡产生, 或是由相干的激光脉冲通过非线性光学差频变换产生.

(4) 低能性: THz 光子的能量只有毫电子伏特, 因此不容易破坏被检测的物质.

这些特点决定了 THz 技术存在的价值, 并可以预见其巨大的应用潜能. 下面分别叙述 THz 光谱的若干技术应用.

### 1 THz 技术作为材料的分析和测试手段

在 THz 技术中, THz 时域谱(THz-TDS)是一种非常有效的测试手段. 典型的 THz 时域谱实验系统主要是由超快脉冲激光器、THz 发射元件、THz 探测和时间延迟控制系统组成, 如图 1 所示. 来自超快激光器的具有飞秒脉宽的激光脉冲串列被分为两路. 一路作为抽运光, 激发 THz 发射元件产生 THz 电磁波. THz 发射元件可以是利用光整流效应产生 THz 辐射的非线性光学晶体, 也可以是利用光电导机制

\* 2000-12-04 收到初稿, 2001-06-01 修回

发射 THz 辐射的赫兹偶极天线.另一路作为探测光与 THz 脉冲汇合后共线通过 THz 探测元件.由于 THz 波的周期通常远大于探测光的脉宽,因此探测光脉冲通过的是一个被 THz 电场调制的接收元件.和 THz 脉冲的激发方式类似,检测技术也分为两种:(1)使用电光(EO)晶体作为 THz 脉冲接收元件,这里利用了晶体的 Pockels 效应,即 THz 电场对探测光脉冲的偏振状态进行调制;(2)使用半导体光电导赫兹天线作为 THz 接收元件,利用探测光在半导体上产生的光电流与 THz 驱动电场成正比的特性,测量 THz 脉冲的瞬间电场.延迟装置通过改变探测光与抽运光间的光程差,使探测光在不同的时刻对 THz 脉冲的电场强度进行取样测量,最后获得 THz 脉冲电场强度的时间波形.

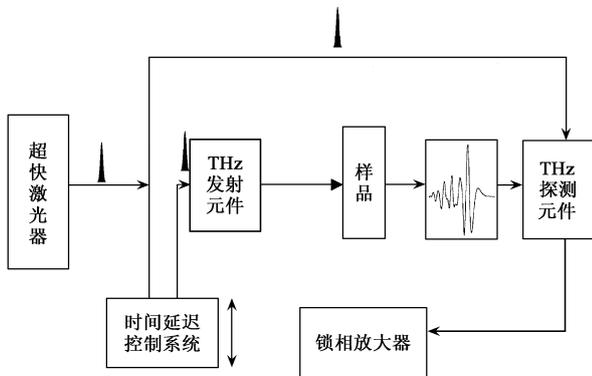


图1 THz 时域谱测试系统示意图

对 THz 时间波形进行傅里叶变换,就可以得到 THz 脉冲的频谱.分别测量通过试样前后(或直接从试样激发的) THz 脉冲波形,并对其频谱进行分析和处理,就可获得被测样品介电常数、吸收系数和载流子浓度等物理信息. THz 测量技术的高信噪比和单个 THz 脉冲所包含的宽频带,使得 THz 技术能够迅速地对材料组成的微细变化作出分析和鉴定.随着信息技术的发展,目前对光电子材料响应速率的要求已经达到了 GHz 甚至 THz 的范围. THz 时域光谱技术的非接触测量性质在这一方面具有独特的优势<sup>[2]</sup>,能够对半导体和电介质薄膜及体材料的吸收率和折射率进行快速、准确的测量<sup>[3]</sup>,得到吸收率和折射率在 GHz—THz 频段精确的分布.特别应该指出的是,THz 脉冲的相干测量技术在获得脉冲电场振幅的同时,也直接测量了脉冲各频率分量的位相,而不需要求助于 Kramers - Kronig 关系来间接得出.这一特性使 THz 技术尤其适用于材料折射率的检测,这往往是传统的光学方法所难以测量的.

在传统的 THz 时域谱测量系统的基础上,加入

对被测样品的调制,就形成了 THz 时域差异谱技术.应用此技术可实现对微米乃至亚微米量级厚度的薄膜进行介电常数的测量<sup>[4]</sup>. THz 时域光谱技术对材料的光学常数测量的精度可高于 1 %<sup>[5]</sup>.

由于许多大分子的振动能级或转动能级间的间距正好处于 THz 的频带范围,THz 时域光谱技术在分析和研究大分子(质量数大于 100 的分子)方面具有广阔的应用前景.实验表明,利用 THz 时域谱技术进行 DNA 鉴别是可能的(见图 2)<sup>[6]</sup>.此外,THz 还被用来研究某些生化试剂和酶的特性<sup>[7]</sup>,等等.由于探测系统的取样窗口在亚皮秒的时间尺度,当存在强背景辐射时,绝大部分背景噪音信号可以被完全排除,这一特点使 THz 时域谱技术在某些场合具有不可替代的作用.例如,在对火焰的研究方面,THz 时域谱技术就是目前仅有的、对非相干辐射不敏感的探测系统<sup>[8]</sup>.

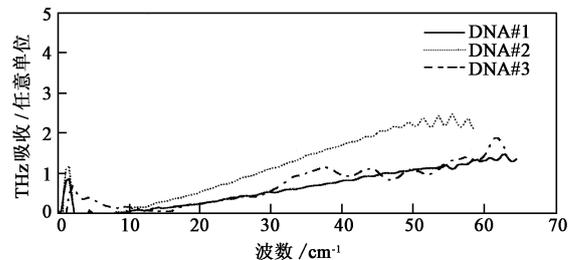


图2 不同 DNA 样品 THz 吸收率随波数的变化<sup>[6]</sup>

在基础物理学研究中,THz 技术同样发挥着重要的作用.由于 THz 辐射脉冲的时间宽度在皮秒和亚皮秒的量级,因此 THz 技术被广泛应用于超快时间分辨的光谱探测,如半导体和超导体中的超快载流子动力学过程和电声子相互作用过程<sup>[9,10]</sup>,高温超导材料中库珀电子对在临界温度附近的位相相关性的动力学研究<sup>[11]</sup>等.

## 2 THz 成像技术

可见光、X 射线、电子束、中近红外光和超声波是医学诊断、材料分析以及在工业生产等诸多领域广泛应用的主要成像信号源,与以上的光源相比,THz 辐射对于电介质材料具有类似的穿透效果,除了可测量由材料吸收而反映的空间密度分布外,还可通过位相测量得到折射率的空间分布,获得材料的更多信息,这是 THz 时域光谱的独特优点.此外,THz 源的光子能量极低,没有 X 射线的电离性质,不会对材料造成破坏.因此,THz 成像技术有望在安全

检查和医学检查等方面成为 X 射线检测的补充手段。

THz 成像所依据的基本原理是:透过成像样品(或从样品反射)的 THz 电磁波的强度和相位包含了样品复介电函数的空间分布.将透射 THz 电磁波的强度和相位的二维信息记录下来,并经过适当的处理和分析,就能得到样品的 THz 图像. THz 成像系统的构成如图 3 所示. THz 成像系统的构成和工作原理与 THz 时域谱测试系统相似. THz 波被聚焦元件聚焦到样品的某一点上.收集元件则将透过样品(或从样品反射)的 THz 波收集后聚焦到 THz 探测元件上. THz 探测元件将含有位置信息的 THz 信号转化为相应的电信号.图像处理单元将此信号转换为图像.

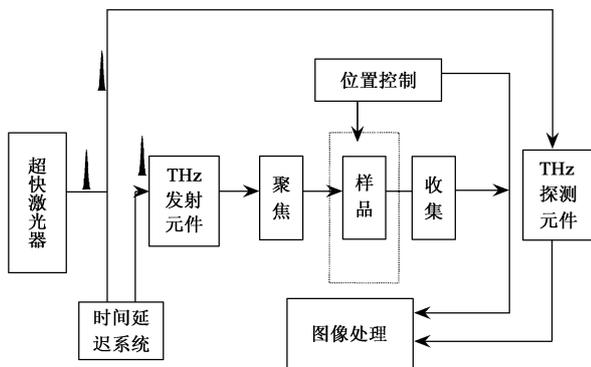


图 3 THz 成像系统示意图

贝尔实验室的一个研究组已成功地应用 THz 扫描成像技术拍摄到封装在 IC 芯片中的封装金属引线<sup>[12]</sup>. THz 成像技术还可以对半导体材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<sup>[13]</sup>. THz 成像在生物医学样品中的应用也已经得到了广泛的关注<sup>[14,15]</sup>.

THz 的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 THz 显微成像的分辨率已达到几十微米,实例见图 4<sup>[16]</sup>.

在图 4 中,为提高传统 THz 显微成像的分辨率,增加了一路控制(gating)光,控制光经聚焦照射在半导体中激发光生载流子,使焦点处光生载流子的局部浓度高于未遇控制光的部分,局部浓度高的部分对 THz 的阻挡本领偏高,这样就造出一个负的“动态小孔”.使用了“动态孔径”的近场成像系统大大提高了 THz 成像的分辨率.

在较长的一段时间里,THz 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

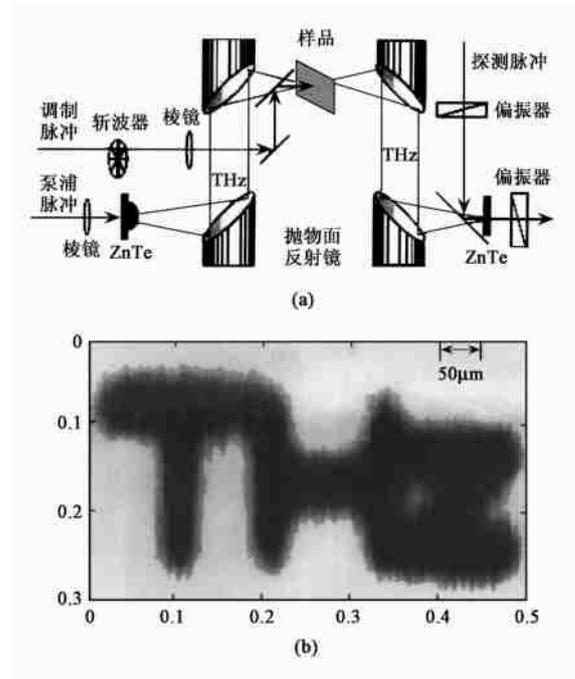


图 4

- (a) 使用了“动态孔径”的近场成像系统;
- (b) 利用带有“动态孔径”的近场成像系统扫描出的图片

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.

### 3 应用 THz“雷达”技术进行敏感探测

能否同微波一样,THz 也用来制成“雷达”?能否利用来自目标各层次界面反射的 THz 电磁波的波形和时间差信息,探知目标或探测其内部形貌呢?答案是肯定的.图 5 就是利用上述技术获得的硬币不同层面的反射像.从技术特点上看,由于 THz 辐射具有比微波更短的波长以及更为精确的时间检测装置,THz“雷达”技术可以探测比微波雷达更小的目标和实现更精确的定位,因而 THz“雷达”技术有望在军事装备的实验室模拟研制、安全监测和医学检验上发挥其潜力.在实验室,已经利用 THz“雷达”技术对动物组织的烧伤进行了探测,并且可以对烧伤深度和程度作出标定,以辅助诊断皮肤的烧伤程度<sup>[2]</sup>.

综上所述,作为一种新兴的光谱分析手段,THz 技术由于光源本身和探测技术所具有的特点,在时域光谱研究和应用等领域正呈现出蓬勃的发展趋势,在基础研究、信息和光电子材料的检测、化学和

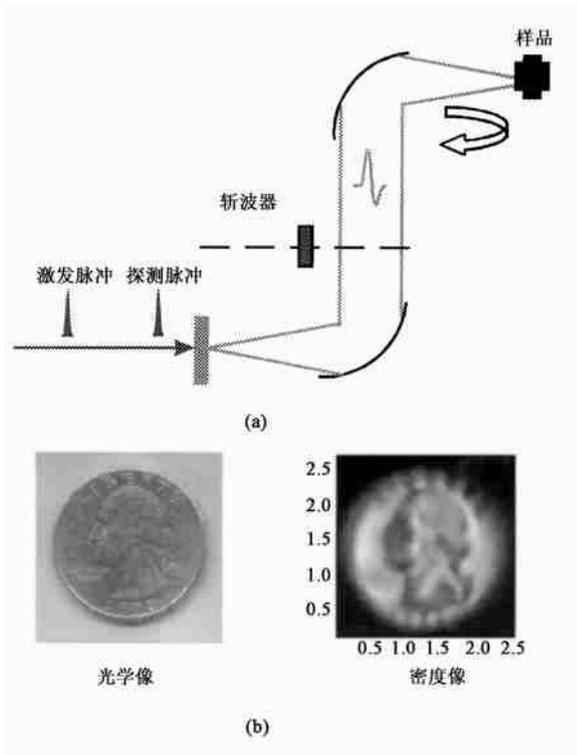


图5 利用 THz 发射接收装置测量硬币的逐层像  
 (a) THz 发射接收装置成像系统图;  
 (b) 硬币的 THz 逐层成像和光学像的比较  
 (图中纵、横坐标的单位为 cm)

生物样品的分析鉴定、生物医学、物体内部逐层探测,乃至现代通信技术等领域都展现出巨大的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Verghese S, McIntosh K A, Brown E R. IEEE Trans. Microwave Th. Tech., 1997, 45 :1301
- [ 2 ] Mittleman D M, Gupta M, Neelamani R *et al.* Appl. Phys. B, 1999, 68 :1085
- [ 3 ] Grischkowsky D, Soren Keiding, Martin van Exter *et al.* J. Opt. Soc. Am. B, 1990, 7(10) :2006
- [ 4 ] Jiang Z P, Li M, Zhang X C. Appl. Phys. Lett., 2000, 76 :3221
- [ 5 ] Lionel Duvillaret, Frederic Garet, Jean-Louis Coutaz. Appl. Opt., 1999, 38 :409
- [ 6 ] Markelz A G, Roitberg A, Heilweil E J. Chem. Phys. Lett, 2000, 320 :42
- [ 7 ] Woolard D, Kaul R, Suenram R *et al.* IEEE MTS Digest, 1999, p. 925
- [ 8 ] Chevillat R A, Grischkowsky D, Opt. Lett., 1995, 20 :1646
- [ 9 ] Tanichi N, Wada N, Nagashima T *et al.* Physica C, 1997, 293 :229
- [ 10 ] Dekorsky, Auer H, Waschke C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 74 :738
- [ 11 ] Corson J, Mollozzi R, Orenstein J *et al.* Nature, 1999, 398 :221
- [ 12 ] Smith P R, Auston D H, Nuss M C. IEEE J. Quantum Electron., 1988, QE-24 :255
- [ 13 ] Hangyo M, Shikii S, Yamashita M *et al.* IEEE Trans. Appl. Superconduct., 1999, 9 :3038
- [ 14 ] Das B B, Yoo K M, Alfano R P. Opt. Lett., 1993, 18 :1092
- [ 15 ] Han P Y, Cho G C, Zhang X C. Opt. Lett., 2000, 25 :242
- [ 16 ] Chen Q, Jiang Z P, Xu G X *et al.* Optics Letter, 2000, 25 :1122

## 封 面 说 明

封面是用扫描隧道显微镜观察到的吸附在硫醇自组装单层膜表面的  $C_{60}$  二维取向畴界负偏压图像的立体图示.图中  $C_{60}$  分子排成完整的二维紧密堆阵列,但阵列内存在两种明显不同的分子取向,由此形成一种新型的取向畴界结构.该畴界附近没有结构缺陷存在,  $C_{60}$  分子的位置序和键向序都得到了完整的保持.由于  $C_{60}$  分子与衬底硫醇分子只有弱的范德瓦耳斯相互作用,因此这种结构反映了  $C_{60}$  二维系统的本征性质.

(中国科学技术大学结构研究开放实验室 王克东 王兵 杨金龙 侯建国)