

# 太赫兹科学与技术研究回顾\*

Bradley Ferguson<sup>1, 2</sup> 张希成<sup>1, †</sup>

(1 美国伦斯勒理工学院太赫兹研究中心 美国纽约州特洛伊市)

(2 Adelaide 大学生物医学工程中心和电子工程系 南澳大利亚)

**摘 要** 太赫兹光谱系统利用远红外辐射获得分子的某些光谱信息, 这些信息在电磁谱的其他波段中是很难得到的. 材料的研究是现代太赫兹系统中的重要的组成部分, 一方面因为新的、大功率的太赫兹光源极大地依赖于如量子级联结构一类的新材料; 另一方面, 太赫兹的光谱和成像技术也为扩展诸如半导体和生物有机分子等材料的应用提供了一个有力的工具.

**关键词** 太赫兹, 太赫兹发射, 太赫兹探测, 太赫兹成像

## Materials for terahertz science and technology

Bradley Ferguson<sup>1, 2</sup> ZHANG Xi-Cheng<sup>1, †</sup>

(1 Center for Terahertz Research, Rensselaer Polytechnic Institute, 110 8th Street Troy, New York, 12180-3590, USA)

(2 Centre for Biomedical Engineering and Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Adelaide, South Australia 5005, Australia)

**Abstract** Terahertz spectroscopy systems use far-infrared radiation to extract molecular spectral information in an otherwise inaccessible portion of the electromagnetic spectrum. Materials research is an essential component of modern terahertz systems; novel, higher-power terahertz sources rely heavily on new materials such as quantum cascade structures. At the same time, terahertz spectroscopy and imaging provide a powerful tool for the characterization of a broad range of materials, including semiconductors and biomolecules.

**Key words** terahertz, terahertz sources, terahertz detection, terahertz imaging

近年来随着大功率的发射源和更加灵敏的探测技术的应用, 利用太赫兹系统对材料的研究有了很大的发展. 太赫兹系统在诸多方面的应用(包括半导体材料、高温超导材料的性质研究、断层成像技术、无标记的基因检查、细胞水平的成像以及化学和生物的检测等)已经把太赫兹研究的重要性凸现出来.

太赫兹辐射是从 0.1 到 10 THz ( $10^{12} \text{ s}^{-1}$ ) 的电磁辐射. 电磁光谱在太赫兹区域几乎是最难捉摸的. 在电磁光谱上, 太赫兹波段两侧的红外和微波辐射技术已经非常成熟(见图 1), 但是太赫兹技术却和邻近波段上的这些成熟技术很不相称. 从太赫兹辐射研究的历史上看, 早期人们对太赫兹辐射研究的

兴趣主要是来源于大气对太赫兹波的强吸收, 因此太赫兹光谱技术主要是被化学家和天文学家用于研究一些简单分子的转动和振动的光谱性质以及热发射射线. 但是在过去的 20 年中, 太赫兹技术已经发生了深刻的变革. 随着新的材料技术提供了新的更高功率的发射源, 太赫兹技术已经被证明在更加深入的物理研究以及实际应用中有着广阔的应用前景. 由于和半导体、制药、加工、空间以及国防工业密切相关, 太赫兹技术成为一个非常有吸引力的研究领域. 近来的一些新的进展更加扩展了太赫兹技术的

\* 2002 - 10 - 29 收到

† 通讯联系人. E-mail zhangxc@rpi.edu

应用前景. 这些新的进展包括量子级联太赫兹激光<sup>[1]</sup> 利用太赫兹波检测飞摩尔含量的 DNA 的单碱基对的差异<sup>[2]</sup> 以及对多粒子电荷与太赫兹光谱相互作用的研究<sup>[3]</sup>. 本文将对这些研究进展和其他的一些重要的研究结果进行回顾.

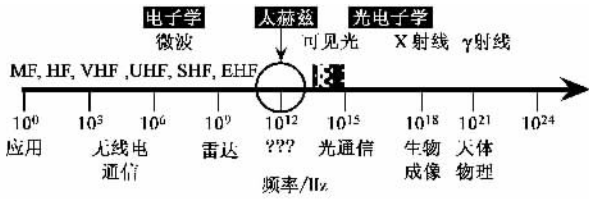


图1 电磁波谱

(对不同波段的有效发射和接收装置的研究结果导致了工业的诞生. 对材料工业的研究使光源和探测装置得到改进. 这点持续地促进了对太赫兹可能应用的研究)

## 1 太赫兹光谱系统概述

太赫兹光谱技术可以被用来研究材料的远红外性质和频率的关系, 这些关系可以帮助我们深入了解与材料应用相关的重要的材料性质. 目前已经有很多方法可以得到材料的太赫兹光谱. 傅里叶变换光谱(FTS)可能是最常见的用来研究分子共振的手段. 这种技术的优越性是有着很宽的光谱波段, 可以用来研究材料从太赫兹到红外波段的光谱性质. 在FTS的实验中, 材料样品被一个宽波段的辐射源(如电弧灯)照明, 一个直接的测量装置(如液氮冷却的热辐射测量仪)被用来测量干涉信号. 样品被置于一个光学干涉仪系统中, 扫描干涉仪的一个臂的行程获得被样品调制的红外辐射的时间域的信号, 然后对信号进行傅里叶变换, 就获得了样品的功率谱密度. FTS方法的缺点是它的有限的光谱分辨率. 更高光谱分辨率的测量可以使用更窄波段的可调谐太赫兹光源或者探测器, 这是第二种太赫兹技术. 在这样的技术系统中, 可调的太赫兹光源或者探测器被调谐到需要的波段, 样品在光谱上的反应被直接测量. FTS和窄波段的光谱技术也都被广泛地用于被动监视分子热发射谱线的系统中, 主要用于天文学的研究中.

第三种太赫兹技术是太赫兹时域光谱技术(THz-TDS). 它是最新的太赫兹技术. THz-TDS技术利用宽波段的太赫兹脉冲辐射, 这通常是利用超快激光脉冲技术获得的. THz-TDS技术是20世纪80年代由AT&T, Bell实验室和IBM公司的T. J. Watson研究中心发展起来的<sup>[4,5]</sup>. 尽管THz-TDS

技术的光谱分辨率和窄波段技术相比还是非常粗糙的, 并且这种技术可以测量的频谱范围和FTS相比也很小, 但是THz-TDS技术还是有着很多优点, 这些优点已经促成了近来很多新的应用. 在THz-TDS技术中, THz电场是被相干测量的, 这一点同时提供了高的灵敏度和时间分辨的相位信息. 同时THz-TDS也适用于成像系统, 以提供更加丰富的光谱图像. 图2是一个THz-TDS系统的示意图. 典型的THz-TDS的频谱范围是2—5 THz, 光谱分辨率是50 GHz, 采集时间低于1min, 基于电场的动态范围可以达到 $1 \times 10^5$ . 通过信号处理的算法可以改善测量的信噪比使之达到30%<sup>[6]</sup>.

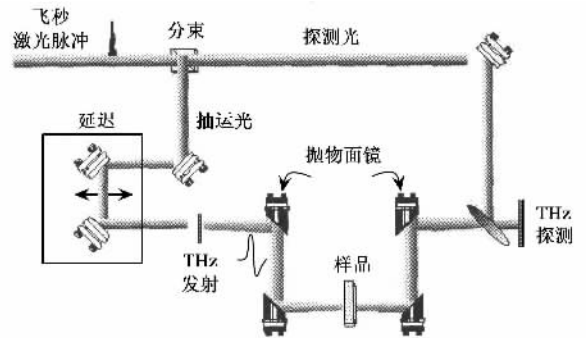


图2 太赫兹THz-TDS装置示意图

## 2 太赫兹光源

缺少高功率、低造价和便携式的室温太赫兹光源是限制现代太赫兹应用的最主要因素, 但是, 仍有很多光源可能成为潜在的候选者, 在快速电子学、激光和材料研究中, 每一种光源都有其独特的优点. 这些光源可以被粗略地分为以下几类: 不相干的热发射光源、宽波段脉冲(T-ray)技术以及窄波段的连续波方法.

### 2.1 宽频带的太赫兹光源

大多数的宽波段脉冲太赫兹光源是由超短的激光脉冲对不同材料的激发引起的. 几种不同的机制引起了太赫兹的发射, 包括在光电导天线中光生载流子的加速, 电光晶体中的二阶非线性效应, 等离子体振荡<sup>[7]</sup>和电子非线性传输线<sup>[8]</sup>. 但是, 目前这些方法的转换效率都很低, 所以, 太赫兹光束的平均功率只有纳瓦到微瓦的数量级, 而作为激发太赫兹辐射的飞秒光源的平均功率却有瓦的数量级.

光电导和光整流是最常见的两种产生宽频带脉冲太赫兹辐射的方法. 光电导的方法是使用高速的光电导材料作为辐射天线提供瞬态电流<sup>[9]</sup>. 通常的

光电导材料包括高电阻率的 GaAs, InP 以及用放射的方法制造缺陷的 Si 晶片. 金属电极被用于在这些光电导体上施加偏置电压, 并且形成天线.

在光电导的天线中, 发射太赫兹光束的机制是超快的激光光束(光子的能量大于该种材料的能隙宽度,  $h\nu \geq E_g$ ) 在光电导材料中产生了电子-空穴对, 自由载流子在偏置电场中被加速, 产生瞬变的光电流. 这种快速的、随时间变化的电流会辐射电磁波. 一些材料的参数会影响最终产生的太赫兹辐射的能量和频谱宽度. 对有效的太赫兹辐射来说, 光电流的快速增加和衰减是必需的. 所以, 电子有效质量较小的半导体材料, 如 InAs 和 InP 是有希望的材料. 最大迁移率也是一个重要的参数, 但它主要被带内的散射率或直接带隙半导体如 GaAs<sup>[10-12]</sup> 的谷间散射限制. 因为辐射的能量主要是来源于以偏置静电场的形式储存的表面能, 太赫兹辐射的能量是被偏置电场和激发光强<sup>[13]</sup> 限制的. 材料的击穿电场是另一个重要的参数, 因为击穿电场决定了可以施加的最大电场. 光电导的发射装置可以产生相对大的(大约 40  $\mu\text{W}$ ) 太赫兹辐射功率<sup>[14]</sup> 和相当宽的辐射带宽(4 THz)<sup>[15]</sup>.

光整流是太赫兹脉冲产生的另一种机制, 它是基于电光效应的逆过程<sup>[16]</sup>. 在这里, 飞秒的激光脉冲也是必需的, 但是与光束作为触发的光电导材料不同, 光整流发射的太赫兹光束的能量是直接来源于激光脉冲的能量的. 光整流的转换效率主要依赖于材料的非线性系数和相位匹配条件.

这种技术最早是在利用 LiNbO<sub>3</sub> 产生远红外辐射的过程中来实现的<sup>[17]</sup>. 各国的物理学家在研究不同材料的电光特性以优化太赫兹发射方面已经进行了大量的研究, 包括传统的半导体 GaAs 和 ZnTe, 有机晶体材料如 4-dimethylamino-N-methylstilbazoliumtosylate (DAST) 等<sup>[18-20]</sup>. 因为光整流是将入射光束功率从光频耦合到太赫兹频段, 这种耦合效率较低, 所以这种方法输出的太赫兹辐射的功率与光电导天线的方法相比较小. 但是这种方法的优点在于可以输出更宽的辐射带宽, 通常可以达到 50 THz<sup>[21]</sup>. GaSe 材料中的相位匹配的光整流过程可以发射中心波长可调的超宽太赫兹脉冲. 以垂直于入射光的水平轴旋转晶体, 以调整相位配合条件, 可以调谐发射频率至高达 41 THz<sup>[22, 23]</sup>.

## 2.2 窄频带的太赫兹光源

窄频带的光源对于高频谱分辨率的应用是十分重要的, 在通信和极宽频带的卫星通信上也有广泛

的应用前景. 所以在过去的—个世纪里, 很多研究工作集中在开发窄波段的 THz 光源上<sup>[24]</sup>. 很多新的技术现在仍在发展中, 包括无线电波波源频率上转换, 光源的频率下转换, THz 激光和反向波管. 在这个领域里有很多详尽的回顾文章<sup>[25]</sup>.

主要用于发射低功率(< 100  $\mu\text{W}$ ) 连续太赫兹辐射的是低频微波振荡器的升频转换的技术, 这些振荡器包括电压控制的振荡器和介电共振振荡器. 升频转换的方法通常是通过使用一个平面肖特基二极管倍增器链实现. 使用这种方法, 频率可以高达 2.7 THz<sup>[26]</sup>. 同时, 别的研究正在进行, 例如希望通过改变半导体的结构和改进工艺的方法来降低 Gunn 和 IMPATT 二极管的发光频率, 使其达到太赫兹的频率范围<sup>[27]</sup>. 气体激光器是另一种常用的太赫兹光源的产生方法, 在这种光源中, 利用一个 CO<sub>2</sub> 激光抽运一个低气压的腔, 并在这种气体的某些发射谱线处形成受激发射. 这种光源不是连续可调的, 而且通常需要大的气体腔和上千瓦的能量输入, 但是这种方法可以得到高达 30 mW 的输出功率. CH<sub>4</sub> 和 HCN 激光是最常见的, 它们一般用于光谱测量和外差接收装置的研究.

极高能量的太赫兹发射最近也通过使用自由电子激光和能量回收直线加速器的方法得到<sup>[8]</sup>. 在自由电子激光中, 一束高速自由电子在真空中传输并通过具有空间变化的强磁场. 磁场使得电子束振荡并发射光子. 反射镜用来把光子限制在电子束内, 这里电子束作为激光的增益介质. 这种系统的造价昂贵, 体积巨大, 同时也需要精密的仪器, 但是可以产生连续的脉冲形式的发射, 发射的功率比通常使用的光电导天线高出六个数量级以上. 自由电子激光在对信噪比要求很高的研究中以及太赫兹的非线性的研究中有巨大的应用前景. 基于同一原理的台面系统反向波管可以输出毫瓦数量级的太赫兹发射, 在商业上也是可行的.

一些别的光学技术也被尝试用来产生窄波段的太赫兹发射. 最初的努力开始于 20 世纪 70 年代, 是将两束激光进行非线性混频, 但是该技术一直在为提高转换效率而奋斗<sup>[29]</sup>. 在这种方法中, 两束中心频率有微小差别的连续波长激光被入射到同一块具有高的二阶非线性系数的材料, 如 DAST 中. 这两个频率在材料中产生相干作用, 结果是输出以频率和频率差为中心频率的振荡. 这样的系统可以设计成频率差处于太赫兹的范围. 使用两个频移的激光, 在低温生长的 GaAs 中混频, 或者利用一个多模

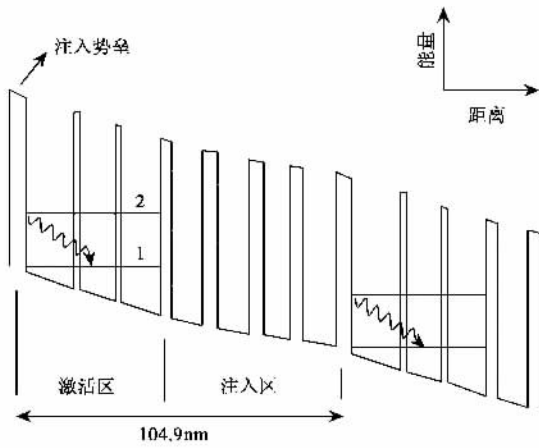


图3 太赫兹级联激光装置的简化能级结构

(电子从4.3 nm厚的AlGaAs层中注入到激活层的能级2中,从能级2到能级1的跃迁可以发射4.4 THz的光子,然后电子逃逸到随后的注入层能带中。在这个激光装置中,7个量子阱的基元被重复了104次,每个量子阱是在厚度为0.6—4.3 nm的AlGaAs势垒间包含了厚度是10—20 nm的GaAs薄层,层的厚度和所加电场的大小是可以调节的,以得到需要的隧穿特性)

激光器发射的两个具有不同频率的模式,已经实现了连续可调的太赫兹发射<sup>[30]</sup>。更加深入的研究方法是使用光学参量发生和振荡技术,其中调Q的Nd:YAG激光抽运光束在非线性晶体中产生一个二次闲频光束,抽运光束和闲频光束的拍即产生太赫兹辐射<sup>[31,32]</sup>。光学技术提供了在一个很宽范围内可调的太赫兹辐射,同时因为使用了固体激光器,体积相对较小,用这种方法已经得到了100mW的输出功率(脉冲)<sup>[33]</sup>。光学下转换是材料研究的一个很活跃的领域,这是因为使用分子束外延和其他材料工艺可以使得生产的材料具有更优异的光学混频特性<sup>[34]</sup>。

半导体激光可能是发射窄波段的太赫兹辐射终极技术。最早的这种激光器是20年前在浅掺杂的P型Ge中,使用正交的电磁场引起空穴数反转形成的<sup>[35]</sup>。通过改变外加磁场和压力的方法,可以改变输出激光的频率。通过施加一个非沿轴向的强压,引起Ge半导体的空穴数反转也可以产生太赫兹激光<sup>[36]</sup>。但是这些激光有一些固有的缺陷,如效率低、输出功率低,需要低温冷却以保证激光条件等。近来半导体沉积生长的技术取得了很大的进步,得到的多量子阱结构已经为发射激光提供了可能。使用分子束外延工艺得到的耦合量子阱结构已经在1994年得到了量子级联激光<sup>[37]</sup>。这些耦合的量子阱是AlGaAs势垒间的纳米厚度的GaAs三明治结构。级联的量子结构包含这样的重复结构,在每个重复结

构中包含一个注入区和一个激活区。在激活区中,存在着粒子数反转和电子向低能级的跃迁,这样就会发射一定波长的光子。电子在量子阱之间隧穿,由于注入区的耦合,电子将处于下一个激活区的高能级。

量子级联激光已经在红外辐射区域实现,但是直到最近,仍有一些因素制约量子级联激光在太赫兹区域发射。主要的问题是由于太赫兹辐射的长波长,长波长导致大的光学模式,结果是小的增益介质和光场之间的耦合作用很弱,并且由于材料中自由电子的作用,存在大的光学损耗(损耗和波长的平方成正比)。Kohler等人<sup>[1]</sup>在最近设计4.4 THz的量子层叠激光中考虑到了上述的问题。他们的这台激光器包含104个重复的基本单元(见图3),700个量子阱结构。这套系统可以在10 K的温度下发射脉冲,工艺的优化将使得在液氮温区的连续激光发射变为可能。

### 3 太赫兹的探测

对太赫兹信号的探测是另一个活跃的研究领域。由于太赫兹源的低的发射功率与相对较高的热背景的耦合,需要高灵敏度的探测手段探测太赫兹信号。在对宽波段的探测中,基于热吸收的直接探测是最常用的手段。这些都需要用冷却的方法降低热背景。最常用的装置是液体He冷却的Si,Ge和InSb热辐射测量仪。热电的红外测量仪器在太赫兹的波段可能也是可以使用的。利用Ni在超导态和正常态之间的转变,应用超导技术已经研制成功非常灵敏的热辐射测量仪。干涉仪技术也可以用来直接得到光谱信息。最近的研究还实现了太赫兹光子的单光子探测器<sup>[38]</sup>。这种探测装置利用包含一个量子点的单光子晶体管工作在强磁场中,得到其他方法所不能达到的灵敏度。尽管测量的速度现在仍被限制在1 ms左右,但是已经有人提出了高速探测的设想,并且这将在太赫兹探测领域引发革命。

在需要高的光谱分辨率的探测中,常用的是外差式探测器。在这样的系统中,探测器中的振荡器以感兴趣的太赫兹频率振动,并与接收到的信号混合。频率下转换的信号就被放大和测量。在室温环境中,半导体结构是可以使用的。平面的肖特基二极管混频器已经在2.5 THz成功地使用在空间技术中<sup>[39]</sup>。高灵敏度的超导外差式探测器需要冷却测量,一些超导结构在这个领域已经使用了超过20年的时间,最广泛使用的是超导-绝缘体-超导结混频器<sup>[40]</sup>。

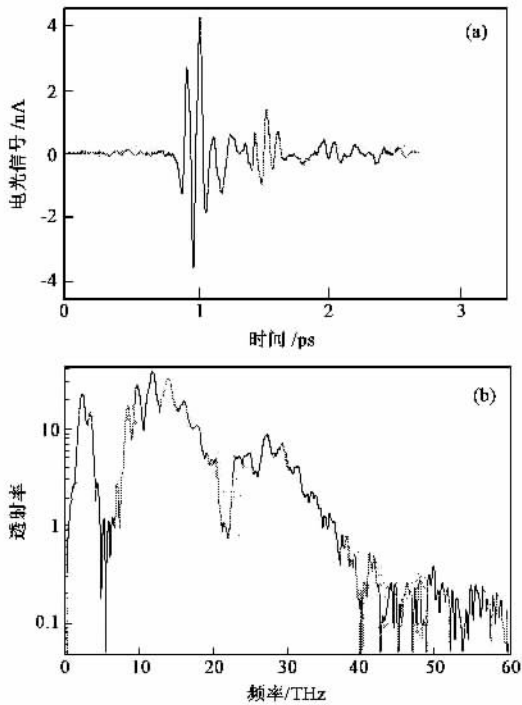


图4 一个宽波段的太赫兹脉冲,从它的频率谱可以看出,这个脉冲已经延伸到了红外波段

(a)在一块  $27\ \mu\text{m}$  厚的 ZnTe 发射源中,利用的光整流的方法得到的太赫兹的时间波形,测量是在一块  $30\ \mu\text{m}$  厚的 ZnTe 中利用自由空间电光取样的方法进行的。(b)这个太赫兹脉冲的频率谱,在  $5.3\ \text{THz}$  的共振吸收是由于 ZnTe 晶体中的一个声子模式

高温超导体(如 YBCO)对于更宽波段的测量是有极大吸引力。一些关于太赫兹窄波段测量的全面地回顾文章可以参阅文献[41]。其他种类的窄波段探测器,如基于等离子体场效应管基频的已经被研究证明可以达到  $600\ \text{GHz}$ [42]。

对于在 THz-TDS 系统中的太赫兹脉冲测量,需要使用相干探测器。最常用的两种方法基于光电导取样和自由空间的电光取样,这两种方法都需要使用超快激光源。电光效应是低频电场(太赫兹脉冲)和激光束(光学脉冲)在探测晶体中的耦合。简单的张量分析表明,使用一块 110 取向的闪锌矿结构晶体可以提供高的灵敏度。太赫兹的电场调制探测晶体的双折射,进而调制了通过探测晶体的探测光束的椭圆偏度。探测光束的被调制的椭圆偏度可以得到包括施加电场的大小和相位在内的各种信息[43,44]。

使用超短激光脉冲( $< 15\ \text{fs}$ )和薄的探测晶体( $< 30\ \mu\text{m}$ )可以进行中红外波段的电光信号探测。图4(a)是一个典型的中红外太赫兹脉冲的波形,图4(b)是这个脉冲的傅里叶变换。最高的频率大于 30

THz。 $5.3\ \text{THz}$  的共振吸收是由 ZnTe 的声子模式引起的。在使用薄的探测器的情况下,有的研究小组已经获得了  $100\ \text{THz}$  的宽频带探测结果[45]。

光电导天线也被广泛地应用于太赫兹脉冲的探测,这里使用一种与光电导发射天线相同的装置。但与在电极上加上偏置电压不同,这里对 THz 电场激发的电流进行放大和测量,以得到瞬态电流的大小。使用这种方法已经得到了高达  $60\ \text{THz}$  的宽波段太赫兹测量结果[46]。

## 4 太赫兹技术的应用

研究太赫兹光源和光谱系统的最基本的动机是得到材料在其他波段上不具有的信息。天文和空间的研究极大地促进了太赫兹的研究,因为在类星体的宇宙尘埃、彗星和行星中,由于有大量氧气、水和一氧化碳分子,所以含有大量的和太赫兹相关的信息[47]。最近的几年时间中,太赫兹光谱系统已经被使用到大量的材料中,既为了研究基本的材料特性,也为了研究太赫兹在探测上的应用。在本文的以下部分,我们将回顾最近发展的几种应用。

### 4.1 材料特性的研究

太赫兹光谱系统的一项主要应用就是研究材料的特性,特别是轻分子和半导体。太赫兹光谱技术已经被用来定出掺杂半导体如 GaAs 和 Si 晶片的载流子的富集度和迁移率[48-50]。Drude 模型被用来联系与频率有关的介电响应和自由载流子动态特性,包括等离子的角频率和阻尼率之间的关系。一项重要的研究集中在薄膜的介电常数的测量上[51]。

高温超导体的特性研究是太赫兹光谱技术应用的另一个重要领域。一些超导薄膜已经使用太赫兹光谱技术研究了包括穿透深度和超导能隙等的性质。THz-TDS 已经被用来研究新超导材料  $\text{MgB}_2$  的性质。这种材料有高达  $39\ \text{K}$  的超导转变温度,但是这种材料在理论上并没有被很好地理解。THz-TDS 技术定出这种材料的超导能隙大约是  $5\ \text{meV}$ 。这个数字只有目前理论预言的数值的一半,显示这种材料有着复杂的相互作用[52]。

使用光学抽运的太赫兹测量系统可以揭示材料的更多的信息。在这一实验技术中,先使用超快光脉冲激发材料,然后太赫兹脉冲被用来探测被激发的材料的动态远红外光学特性。Leitenstorfer 等人使用光抽运的太赫兹系统研究了 GaAs 中被超快光脉冲激发的电荷-空穴等离子体中电荷-电荷之间相互

作用的时间演化. 这项研究为量子运动学对库仑场建立和屏蔽形成准粒子作出的理论预言提供了实验证据.

#### 4.2 太赫兹成像和断层成像技术

脉冲太赫兹成像, 或称“T光成像”技术最早是由 Hu 和 Nuss 在 1995 年实现的<sup>[53]</sup>, 并在此后已经被用于各个方面, 包括半导体<sup>[54]</sup>、癌症组织<sup>[55]</sup>和火焰<sup>[56]</sup>. 太赫兹成像技术对人的吸引力主要是来自于它的相位敏感的光谱成像能力, 利用这一点人们有可能实现材料鉴别和“功能性成像( functional image )”. 太赫兹系统用于干介电物质的成像是非常理想的, 包括纸、塑料和陶瓷等. 这些材料对这个波段相对来讲是不吸收的, 但是由于有不同的折射率, 利用太赫兹的相位信息, 不同的材料是很容易被分辨的. 在光学波段, 很多材料是不透明的, 而对于 X 射线成像来说, 又只能达到很低的对比度. 所以太赫兹成像系统在安全检查和生产质量控制等方面可能得到广泛的应用. 这里一个重要的研究目标是得到太赫兹三维断层扫描的成像系统<sup>[57]</sup>. 图 5 显示了两个不同折射率的圆柱体重现的横截面结构和由此得到的三维图像. 这套系统的原理和 X 射线的计算机断层成像技术是相同的, 但是通过宽频带的和相位敏感的太赫兹技术可以得到材料对频率依赖的很多特性<sup>[58]</sup>. 利用太赫兹成像系统研究细胞结构的兴趣也在增长. 在这方面的主要的局限来自含水的组织. 瑞利极限限制了远场的分辨率为波长的量级, 对于一个太赫兹, 就是 0.3 mm. 因为这个原因, 太赫兹成像技术主要依靠近场成像的方法得到高的空间分辨率. 利用近场技术, 和光学近场显微技术相同, 使用中心波长为 600  $\mu\text{m}$  的太赫兹辐射, 已经得到了 7  $\mu\text{m}$  的空间分辨率<sup>[59]</sup>. 另外一种可以利用的方法是使用高频的太赫兹脉冲. 图 6 显示了洋葱细胞的太赫兹显微图像, 分辨率接近 50  $\mu\text{m}$ , 这里使用的就是中红外波段宽波段的太赫兹脉冲. 图像的对比度主要是由细胞不同的含水量和细胞间组织决定的<sup>[60]</sup>.

#### 4.3 太赫兹在生物学上的应用

太赫兹系统在生物学上也有着广泛的应用, 活跃的研究领域从癌症检查<sup>[61]</sup>到基因分析. 这些应用的基础是, 很多蛋白质和 DNA 的集团振动模式从理论上预言是处于太赫兹波段的. 太赫兹还可能用来揭示生物分子构象的信息. 带有 DNA 和其他生物分子的压片已经使用太赫兹的方法得到了复数的折射率, 在低频红外激发的模式上存在着大量的吸收<sup>[62, 63]</sup>.

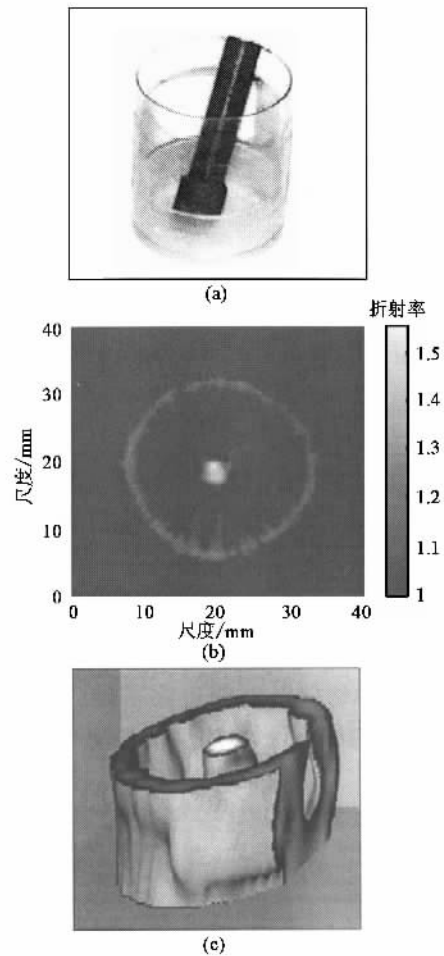


图 5 两个塑料圆柱体的太赫兹计算机断层扫描图像 (a) 被测量物体的光学图像 (b) 利用断层扫描技术得到的图像, 每个横截面的折射率得到了重现. 图中的灰度显示了两种不同塑料材料的折射率变化 (c) 横截面的图像被叠加在一起得到了三维的图像. 图上显示的是一个表面着色的图像

DNA 分析是利用鉴别核酸上的碱基序列而开发并进一步应用的. 生物芯片是一项越来越受欢迎的研究项目, 在生物芯片上, 未知碱基顺序的分子被已知碱基序列的分子进行荧光标记. 但是荧光标记的方法会降低检查的准确性并增加成本和准备时间. 因此, 一些“不标记”的方法已引起研究者的兴趣. 太赫兹光谱技术在这方面可能是有潜力的. 利用折射率的不同, 太赫兹光谱已经显示了分辨单股和双股 DNA 的能力<sup>[64]</sup>. 最近, 同一研究小组又得到了检测飞摩尔灵敏度的单碱基对变异的能力.

太赫兹在生物学上的进一步应用是 T 射线生物探头<sup>[65]</sup>. 一种简单的生物探测器已经可以用来探测糖蛋白 avidin 和维生素 H 的混合物. 维生素 H 被沉积在固体的衬底上[图 7(a)], 然后这个生物探头的一半被暴露在环境或者感兴趣的溶液中, av-

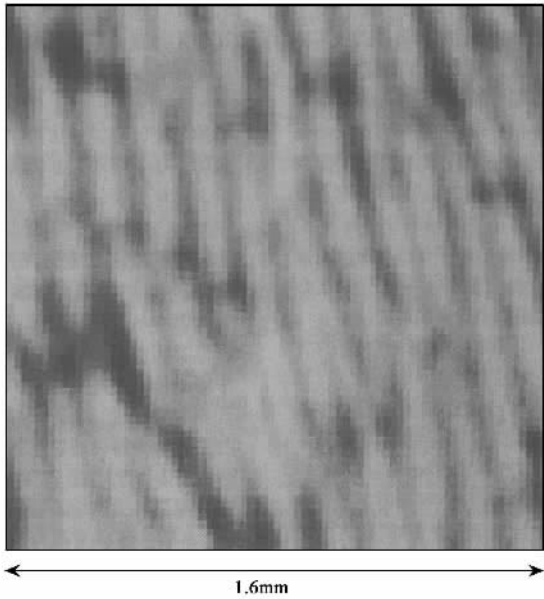


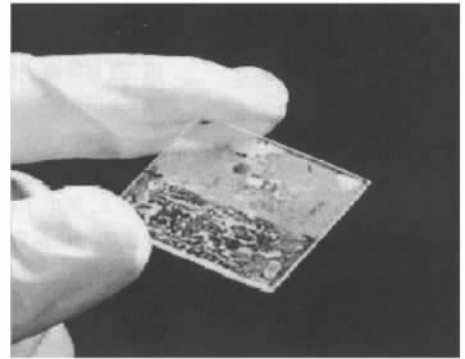
图 6 洋葱细胞膜的太赫兹图像

(这里使用的是一套基于光整流和  $30\mu\text{m}$  厚度的 ZnTe 晶体自由空间电光取样的太赫兹装置,波段的宽度是 40 THz.膜组织的细胞结构是可以观察到的)

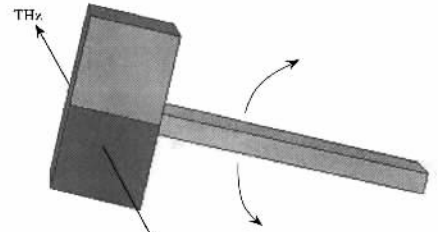
vidin 对维生素 H 有很强的亲和作用,并且和任何一种含维生素 H 的分子结合.利用差异 THz—TDS 技术可以检测因结合造成的维生素 H 的薄膜的远红外光学性质的变化<sup>[66]</sup>.样品被放在电磁振荡器上,太赫兹光束被聚焦并交替通过含 avidin 部分和参考部分[图 7(b)].含有  $0.3\text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$  的 avidin 的样品和一个维生素 H 平板得到的信号有可以分辨的差异[图 7(c)].利用化学的方法使得 avidin 分子和琼脂糖混合,可以提高折射率的对比度,进而使信号得到增强<sup>[67]</sup>.这项技术可以广泛地用于追踪微小的气体和蛋白质.

## 5 展望

太赫兹光谱系统在过去的 10 年时间里取得了很大的进展,改进了的光源和探测手段,仍在进一步扩展太赫兹技术的应用领域,并把太赫兹系统从实验室中逐步转移到工业中.生物医学成像和基因检查是最显著的两项可能的应用.在材料研究、遥远星系的探测以及量子相互作用研究领域,太赫兹光谱系统同样是有吸引力的.太赫兹辐射也有革命性应用的可能,如处理束缚原子,这对于未来的量子计算机是有用的<sup>[68]</sup>.一些重要的研究领域也正在显示太赫兹技术的优越性.这些问题的关键是研制大功率的太赫兹光源.这将促使太赫兹非线性效应的研究,



(a)



(b)

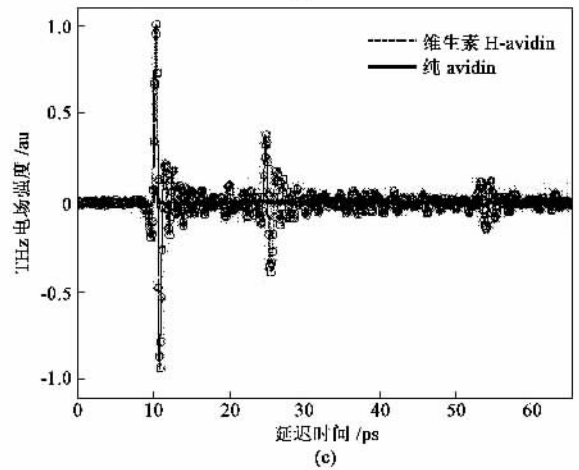


图 7 维生素 H—avidin 生物探头

(a)片状生物探头包含了一块维生素 H 薄膜,薄膜的一半被涂上了 avidin 的溶液(b)测量系统的图示,片状样品被放在电磁振荡器上来回振荡,两部分交替通过太赫兹光束,就可以得到需要的差分信号(c)这是测量到的通过维生素 H—avidin 样品的太赫兹信号,虚线是有  $0.3\text{ ng}\cdot\text{cm}^{-2}$  的 avidin 分子和琼脂糖的混合物时的信号,实线则是无混合物时的信号

并进一步揭示材料的其他特性——高灵敏度的接收装置以及对太赫兹辐射和量子结构以及和生物材料之间相互作用的进一步的深入理解.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Kohler R *et al.* Nature ,2002 ,417 : 156
- [ 2 ] Nagel M , Haring B P , Brucherseifer M *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2002 ,80 : 154
- [ 3 ] Huber R *et al.* Nature ,2001 ,414 : 286

- [ 4 ] Auston D H , Cheung K P , Valdmanis J A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1984 ,53 :1555
- [ 5 ] Fattinger Ch , Grischkowsky D. Appl. Phys. Lett. ,1988 ,53 :1480
- [ 6 ] Ferguson B , Abbott D. Microelectron J. ,2001 ,32 :943
- [ 7 ] Hashimshony D , Zigler A , Papadopoulos D. Phys. Rev. Lett. ,2001 ,86 :2806
- [ 8 ] van der Weide D W , Murakowski J , Keilmann F. IEEE Trans. Microwave Theory Technol. ,2000 ,48 :740
- [ 9 ] Mourou G A , Stancampiano C V , Antonetti A *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1981 ,39 :295
- [ 10 ] Gornik E , Kersting R. In : Semiconductors and Semimetals ( ed. Tsen K T ). San Diego : Academic ,2001
- [ 11 ] Leitenstorfer A , Hunsche S , Shah J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 ,82 :5140
- [ 12 ] Leitenstorfer A , Hunsche S , Shah J *et al.* Phys. Rev. B ,1999 ,61 :16642
- [ 13 ] Darrow J T , Zhang X -C , Auston D H *et al.* IEEE J. Quantum Electron. ,1992 ,28 :1607
- [ 14 ] Zhao G , Schouten R N , van der Valk N *et al.* Rev. Sci. Instrum. ,2002 ,73 :1715
- [ 15 ] Katzenellenbogen N , Grischkowsky D. Appl. Phys. Lett. ,1991 ,58 :222
- [ 16 ] Bass M , Franken P A , Ward J F *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1962 ,9 :446
- [ 17 ] Yang K H , Richards P L , Shen Y R *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1971 ,19 :320
- [ 18 ] Zhang X-C , Jin Y , Yang K *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1992 ,69 :2303
- [ 19 ] Rice A *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1994 ,64 :1324
- [ 20 ] Zhang X-C *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1992 ,61 :3080
- [ 21 ] Bonvalet A , Joffre M , Martin J-L *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1995 ,67 :2907
- [ 22 ] Kaindl R A , Eickemeyer F , Woerner M *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1999 ,75 :1060
- [ 23 ] Huber R , Brodschelm A , Tauser F *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2000 ,76 :3191
- [ 24 ] Wiltse J C. IEEE Trans. Microwave Theory Technol. ,1984 ,32 :1118
- [ 25 ] Siegel P H. IEEE Trans. Microwave Theory Technol. ,2002 ,50 :910
- [ 26 ] Maiwald F *et al.* In : IEEE Microwave Theory and Techniques Society International Symposium Digest ( ed. Sigmon B ) Vol. 3. Piscataway , New Jersey IEEE ,2001. 1637—1640
- [ 27 ] Ryzhii V , Khmyrova I , Shur M S. J. Appl. Phys. ,2002 ,91 :1875
- [ 28 ] Williams G P. Rev. Sci. Instrum. ,2002 ,73 :1461
- [ 29 ] Morris R , Shen Y R. Phys. Rev. A ,1977 ,15 :1143
- [ 30 ] Brown E R , McIntosh K A , Nichols K B *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1995 ,66 :285
- [ 31 ] Kawase K , Sato M , Taniuchi T *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1996 ,68 :2483
- [ 32 ] Shikata J , Kawase K , Sato M *et al.* Opt. Lett. ,1999 ,24 :202
- [ 33 ] Kawase K , Shikata J , Imai K *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2001 ,78 :2819
- [ 34 ] Kadow C , Jackson A W , Gossard A C *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2000 ,76 :3510
- [ 35 ] Komiyama S. Phys. Rev. Lett. ,1982 ,48 :271
- [ 36 ] Gousev Y P *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1999 ,75 :757
- [ 37 ] Faist J *et al.* Science ,1994 ,264 :553
- [ 38 ] Komiyama S , Astaflev O , Antonov V *et al.* Nature ,2000 ,403 :405
- [ 39 ] Gaidis M C *et al.* IEEE Trans. Microwave Theory Technol. ,2000 ,48 :733
- [ 40 ] Dolan G J , Phillips T G , Woody D P. Appl. Phys. Lett. ,1979 ,34 :347
- [ 41 ] Carlstrom J E , Zmuidzinis J. In : Reviews of Radio Science ( ed. Stone W R ). Oxford , UK : Oxford Univ. Press ,1996. 1193
- [ 42 ] Knap W *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2002 ,80 :3433
- [ 43 ] Valdmanis J A , Mourou G A , Gabel C W. IEEE J. of Quantum Electron. ,1983 ,9 :664
- [ 44 ] Wu Q , Zhang X-C. Appl. Phys. Lett. ,1995 ,67 :3523
- [ 45 ] Brodschelm A , Tauser F , Huber R *et al.* In : Ultrafast Phenomena XII ( eds. Elsaesser T , Mukhameel S , Murnane M M *et al.* ). Berlin : Springer 2000
- [ 46 ] Kono S , Tani M , Gu P *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2001 ,77 :4104
- [ 47 ] Holland W S *et al.* Nature ,1998 ,392 :788
- [ 48 ] van Exter M , Fattinger C , Grischkowsky D. Opt. Lett. ,1989 ,14 :1128
- [ 49 ] van Exter M , Grischkowsky D. IEEE Trans. Microwave Theory Technol. ,1990 ,38 :1684
- [ 50 ] Grischkowsky D , Keiding S , van Exter M *et al.* J. Opt. Safety Am. ,1990 ,B7 :2006
- [ 51 ] Jiang Z , Li M , Zhang X-C. Appl. Phys. Lett. ,2000 ,76 :3221
- [ 52 ] Kaindl R A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,88 :027003
- [ 53 ] Hu B B , Nuss M C. Opt. Lett. ,1995 ,20 :1716
- [ 54 ] Mittleman D M , Jacobsen R H , Nuss M C. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. ,1996 ,2 :689
- [ 55 ] Loffler T *et al.* Optics Express ,2001 ,9 :616
- [ 56 ] Cheville R A , Grischkowsky D. Opt. Lett. ,1995 ,20 :1646
- [ 57 ] Ferguson B , Wang S , Gray D *et al.* Opt. Lett. ,2002 ,27 :1312
- [ 58 ] Ferguson B , Wang S , Gray D *et al.* Phys. Med. Biol. ( in press )
- [ 59 ] Mitrofanov O *et al.* IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. ,2001 ,7 :600
- [ 60 ] Han P Y , Cho G C , Zhang X-C. Opt. Lett. ,2000 ,25 :242
- [ 61 ] Woodward R M *et al.* In : OSA Trends in Optics and Photonics ( TOPS ) , Vol 56. Washington DC : OSA ,2001
- [ 62 ] Markelz A G , Roitberg A , Heilweil E J. Chem. Phys. Lett. ,2000 ,320 :42
- [ 63 ] Walther M , Fischer B , Schall M *et al.* Chem. Phys. Lett. ,2000 ,332 :389
- [ 64 ] Brucherseifer M *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2000 ,77 :4049
- [ 65 ] Mickan S P *et al.* Phys. Med. Biol. ( in press )
- [ 66 ] Mickan S P , Abbott D , Munch J *et al.* Fluct. Noise Lett. ,2002 ,2 :13
- [ 67 ] Menikh A , MacColl R , Mannella C A *et al.* Chem. Phys. Chem. ( in press )
- [ 68 ] Cole B E , Williams J B , King B T *et al.* Nature ,2001 ,410 :60



# 半导体发光及其应用专题

## 编者的话

在 1983 年第 9 期《物理》上,原中国物理学会副理事长兼中国物理学会出版工作委员会主任周光召发表了《祝物理学和经济建设栏的开辟》一文(该栏于 2000 年更名为“物理学和高新技术”)。他在该文中精辟地指出:“我国的科学和工业要按照中国自己的国情走自己的发展道路,我们的工业一定要逐步用最新的科学研究成果武装起来,后来居上,跻身于日新月异的国际市场中去。我们需要为长期目标服务的,以基础研究为主的物理学家,更迫切需要从事应用和发展工作,能够直接推动我国工业起飞的物理学家。”“物理学和经济建设栏”将向广大的物理学工作者,向工业界的各级领导同志和工程技术人员介绍物理学研究中的最新成就以及它在国民经济和国防各部门中的应用前景,介绍世界各国在这些研究工作中的进展情况……”周光召院士的这段话为我刊“物理学和高新技术”栏目做了恰当的定位。

2002 年 9 月《物理》编辑部同志参加了第八届全国发光二极管(LED)产业研讨与学术会议,深感本次会议内容丰富,报告精彩,出席会议人数众多,盛况空前。从本次会议还可以明显感知世界发光技术发展的脉搏。古老的物理命题——发光已焕发新的活力。当年半导体能带理论、激子发光、等电子陷阱等物理机理的洞悉,推动着半导体发光的技术发展。如今,发光波长从红、橙、黄向绿、蓝、紫全色延伸,发光材料从 GaAlAs、GaAsP 向 Al-GaInP、GaN 和聚合物等新材料系开拓,器件结构从同质结到异质结,再到量子阱以至光子晶体高效发光,材料生长技术也从气相外延、液相外延向先进的 MOCVD 生长技术发展,可以说从技术层面看,发光技术已进入崭新的发展时期。除全色显示屏、交通信号灯和汽车灯等应用外,潜力无穷的是固态白光照明技术。日本业界估计,占全国能源消耗 20% 的照明用电,一旦为固态光源所代替,则可以在 20 年内不再新建发电厂、站,推而广之,在中国,在全世界发展固态白光照明,则是对 1997 年联合国关于防止地球变暖的京都会议的最好回应。据悉,此事已得到中国工程院的重视,由陈良惠院士负责开展咨询研究。可以看出,发光二极管技术从物理实验室走向应用、走向市场、形成产业意义是重大的。更可喜的是中国发光二极管产业经过几十年的拼搏,已初具规模,据权威部门统计,目前不仅从业厂商达 300 余家,从业人员达 2 万余人,产量超过百亿支,产值近百亿元,而且产业层次也从进口器件转卖,到进口管芯封装,再到进口外延片制管、封装,眼下国产外延片的生产正方兴未艾,呈现很好势头。可以说,发光二极管产业是源于半导体物理、内容丰富、应用前景广阔的产业,是值得企业家和应用物理学家联手合作为之奋斗的产业。

《物理》编辑部在此次会议学术委员会帮助下,成功地组织了一批反映发光二极管研究、应用、开发和产业化的最新进展和动向的稿件。本期先安排 5 篇文章以“半导体发光及其应用专题”的形式发表,还有一些文章将在本栏以后几期陆续发表。组织“半导体发光及其应用专题”的目的是向广大物理工作者,介绍发光二极管前沿热点领域的研究、应用与发展的历史、现状和最新研究成果,以促进我国发光二极管技术的创新与产业的发展。