·特约报告 ·

文章编号: 1001-5078(2006)增刊-0785-07

太赫兹辐射原理与若干应用

李福利,任荣东,王新柯,周斌权
(首都师范大学物理系,北京 100037)

摘 要:文章介绍了太赫兹辐射的原理及在安全检查、中药鉴别等方面的应用。

关键词:太赫兹辐射;太赫兹成像;炸药;中药
中图分类号: O434. 3; O456 **文献标识码**: A

The Theory and Some Applications of Terahertz Radiation

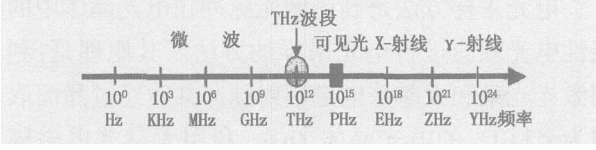
LI Fu-li, REN Rong-dong, WANG Xin-ke, ZHOU Bin-quan
(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: THz radiation is the gap between microwave and far-infrared region. THz time-domain spectroscopy is a powerful tool developed in 1990s for spectroscopy measurement. In the paper the theory and some applications in security examination and Chinese traditional medicine of Terahertz radition are introduced.

Key words: THz radiation; THz imaging; explosive; Chinese traditional medicine

1 太赫兹辐射简介

太赫兹辐射(T射线)通常指的是频率在 0. 1～10THz;波长在 3～30μm之间的电磁波,其波段在微波和红外之间,属于远红外和亚毫米波范畴。在 20世纪 80年代中期以前,由于缺乏有效的产生方法和探测手段,科学家对于该波段电磁辐射性质的了解非常有限,所以在相当长的一段时期,很少有人问津电磁波谱中的这一波段(图 1),以至于形成远红外和亚毫米波空白区,也就是太赫兹空白区。



1 THz～1 ps～300μm～33cm^{-1}～4. 1 eV～48K

图 1 太赫兹波段在电磁波谱中的位置示意图

近十几年来,随着超快激光技术的迅速发展,为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源,使太赫兹辐射的产生和应用得到了蓬勃发展。物质的太赫兹谱包含着丰富的物理和化学信息。同时,太赫兹辐射的优点决定了它在很多方面可以成为傅立叶变换红外光谱技术和 X射线技术的互补技术,太赫兹辐射在很多基础研究领域、工业应用及军事应用领域都有广阔的发展前景。它在生物学、医学、微电子学、农业及安全检查领域也有很大的应用潜力。

2 太赫兹辐射的产生与探测

2. 1 太赫兹辐射的产生

目前产生太赫兹辐射的主要方法是利用超短激光脉冲去激发太赫兹辐射,通常有两种方法:光导天线激发机制和光整流效应。

第一种方法是 20世纪 80年代末 90年代初,D. H. Auston和 D. Grischkowsky等人发展起来的基

作者简介:李福利(1939 -),男,教授,博士生导师;1958 - 1996年在中国科技大学学习和工作,曾到英国帝国学院、罗马大学、国际理论物理中心等进修和工作;1996年调入首都师范大学,任物理系教授、博士生导师,中国科技大学,清华大学,中国科学院研究生院兼职教授;研究领域涉及激光物理,混沌理论,脑功能成像,统一医学和科学与人文的融合;曾任量子电子学报副主编, Chinese Physics Letters和中国激光编委。

收稿日期: 2006-06-23

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

于天线机制,利用光电导来产生太赫兹电磁辐射脉冲的方法。其基本原理是:光电导半导体材料(如GaAs)表面淀积金属制成偶极天线电极结构,利用飞秒激光器照射电极之间的光电导半导体材料,会在其表面瞬时地(10^{-14} s量级)产生大量自由电子-空穴对,这些光生载流子在外加电场或内建电场作用下被加速,在光电导半导体材料表面会形成变化极快的光电流,从而产生向外的太赫兹电磁辐射脉冲。

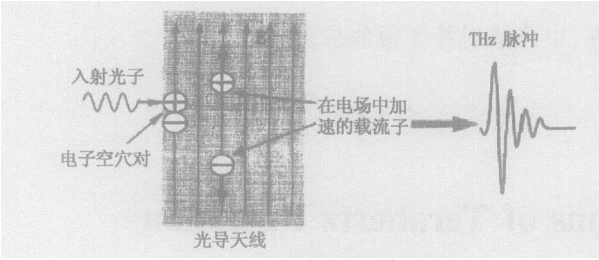


图2 光导天线受激示意图

如图2所示。太赫兹电磁辐射发射系统的灵敏度和响应速度取决于三个因素:光导体,天线几何结构和选通光脉冲宽度。光导体是产生超短电磁脉冲的关键部件,性能良好的光导体应该具有尽可能短的载流子寿命、高的载流子迁移率和介质耐击穿强度。随着对光导开关的深入研究,已开发了很多适宜作光导开关的材料,如硅(Si)、砷化镓(Cr: GaAs)、磷化铟(Fe: InP)等。

用光导开关方法产生太赫兹辐射的方案是以光导体作为辐射天线的瞬态电流元,天线结构通常有基本的赫兹偶极子天线、共振偶极子天线、锥形天线、传输线以及大孔径光导天线等。大多数实验中采用了基本偶极子天线,它的结构相对比较简单。天线结构由3部分组成,即:(1)平面偶极子;(2)产生光电流的光导开关;(3)用作欧姆接触的两条共面微带传输线。

增大外电场可得到更强的太赫兹辐射,制作大孔径的光电导天线可以提高太赫兹辐射的效率。

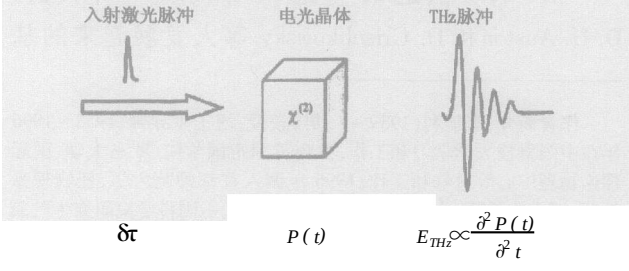


图3 光整流效应

第二种方法是20世纪90年代初,张希成等人发展了沈元壤等的工作,发明基于亚皮秒光整流机制下产生相干太赫兹电磁辐射脉冲的方法。其原理是:利用激光脉冲在电光晶体中的非线性效应,通过远红外差频的方法产生太赫兹电磁辐射脉冲。这种机制利用红外脉冲激光产生太赫兹电磁辐射,类似于利用光波产生静电场,被称为亚皮秒光整流方法。光整流效应是一种非线性效应,是利用激光脉冲(脉冲宽度在亚皮秒量级)和非线性介质(如ZeTe等)相互作用而产生低频电极化场,此电极化场辐射出太赫兹电磁波。

如图3所示。电磁波的振幅强度和频率分布决定于激光脉冲的特征及非线性介质的性质。常用的非线性介质有$LiNbO_3$、$LiTaO_3$、有机晶体DAST、GaAs和ZnTe等。用得最多的是ZnTe和GaAs。另外,DAST是一种很有潜力的有机介质,它是非线性效应最强的物质之一。

两种产生太赫兹电磁波的方法中,用光导天线辐射的太赫兹电磁波能量通常比用光整流效应产生的太赫兹波能量强。因为光整流效应产生的太赫兹波的能量仅仅来源于入射的激光脉冲的能量,而光导天线辐射的太赫兹波的能量主要采自天线上所加的偏置电场,可以通过调节外加电场的大小来获得能量较强的太赫兹波。但是,光导天线产生的太赫兹电磁波的频谱宽度较窄,而光整流产生的太赫兹电磁波的频谱宽度较高。除了以上两种产生太赫兹辐射方法外,目前还有利用耿氏振荡器产生连续太赫兹辐射的方法。

2.2 太赫兹辐射的探测

脉冲太赫兹辐射的探测也有两种方法:光导天线法和电光采样方法。光导天线法是最早用于太赫兹探测的技术,而目前电光采样方法已逐渐取代了光导天线法。

电光采样方法是利用激光脉冲在电光晶体中的线性电光效应进行电光采样的方法。其原理是:利用激光光束和太赫兹电磁辐射脉冲共线经过晶面取向为<110>的电光晶体ZnTe,利用太赫兹电磁辐射脉冲的电场部分通过电光效应调制探测晶体ZnTe的折射率椭球,通过测量载有太赫兹信息的探测光束偏振态的改变,得到太赫兹电磁辐射脉冲的电场信息。

电光探测是二阶非线性光学过程,其中,在与应用场成比例的可见近红外频率,应用电场引发光电

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

材料中折射率发生变化。同步地,这个折射率的变化影响了经过相同材料的超短激光脉冲的圆偏振椭圆率。椭圆率的变化用把探测光束分为两个正交偏振成分的偏振光束分裂器来测量。用一个均衡的光电探测器来测量这两个成分之间的强度差异,并且给出一个与电场直接成比例的信号。通过改变太赫兹脉冲和探测激光脉冲之间的延迟,可以观察到完整的时间依赖的电场。对于太赫兹探测来说,电光探测是最普遍的选择。对于电光探测,象 ZnTe和 GaP这样的闪锌矿晶体是常用的。在这里面,ZnTe是非常合适的,因为它在远红外的折射率与近红外折射率是可比的,这导致了相对有效的太赫兹探测。

光导天线方法是基于光电导效应的光电导取样方法。其原理是:利用一束探测激光脉冲在半导体材料内部产生瞬间载流子,利用太赫兹的电场部分驱动瞬间载流子,这样就可得到反映太赫兹电场信息的电流,从而得到太赫兹信息。

两种探测方法有各自的特点。光导天线探测太赫兹波时由于产生光电流的载流子寿命较长,但是 ZnTe晶体在 5.3THz处存在横向声子吸收,因此其探测带宽较窄。电光采样方法的时间响应只与所用的电光晶体的非线性性质有关,有较高的探测带宽。目前用电光采样探测到的频谱已超过 37THz。同时这种探测方法具有光学平行处理的能力和好的信噪比,使得它在实时二维相干远红外成像技术中具有很好的应用前景。但是,这种方法光路的调节比较麻烦。

3 时域光谱技术简介

太赫兹相干电磁辐射的特点决定了它在光谱技术方面可以成为红外光谱技术、拉曼光谱技术的互补技术,在成像方面可以成为 X射线成像技术的互补技术,从而成为本世纪科学研究的热点。

太赫兹时域光谱技术(Terahertz time domain spectroscopy, THz - TDS)是国际上近年来发展起来的研究技术。它利用物质对太赫兹频带的不同特征吸收谱,分析研究物质成分、结构及其相互作用关系。通常有机分子内化学键的振动吸收频率主要在普通红外波段,但对于分子之间弱的相互作用(如氢键)及大分子的骨架振动(构型弯曲)、偶极子的旋转和震动跃迁以及晶体中晶格的低频振动吸收频率,则对应于太赫兹红外波段范围。这些振动所反映的分子结构及相关环境信息,都在太赫兹波段内不同吸收位置及吸收强度上有明显的响应,有机分子的这些光谱特征,使得利用太赫兹时域光谱技术鉴别化合物结构、构型与环境状态成为可能。

3.1 太赫兹系统光路

典型的太赫兹时域光谱实验系统主要有超快脉冲激光器、太赫兹发射元件、太赫兹探测元件和时间延迟控制系统组成,如图 4所示。

如图 4所示。来自超快激光器的具有飞秒脉宽的激光脉冲列被分为两路,一路作为抽运光,激发太赫兹发射元件产生太赫兹电磁波;另一路作为探测光与太赫兹脉冲汇合后共线通过太赫兹探测元件。太赫兹发射元件可以是利用光整流效应产生太赫兹辐射的非线性光学晶体,也可以是利用光电导机制发射太赫兹辐射的赫兹偶极天线。由于太赫兹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太赫兹电场调制的接收元件。延迟装置通过改变探测光与抽运光之间的光程差,使探测光在不同的时刻对太赫兹脉冲的电场强度进行采样测量,最后获得太赫兹脉冲电场强度的时域波形。对太赫兹时域波形进行傅里叶变换,就可以得到太赫兹脉冲的频谱。分别测量通过试样前后(或直接从试样激发的)太赫兹脉冲波形,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。

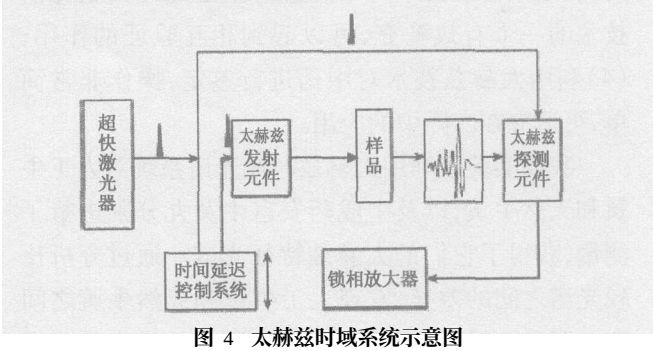


图 4 太赫兹时域系统示意图

3.2 太赫兹时域光谱技术的特点

(1)太赫兹时域电场波形包含了太赫兹脉冲的强度、相位、时间等更完整的信息,通过傅立叶变换可同时得到吸收光谱和色散光谱,通过测量样品在太赫兹波段的吸收光谱和色散光谱,进而得到不同分子的构象和分子间非共价键相互作用的信息;

(2)超快激光激发的太赫兹脉冲峰值功率很高,并且利用飞秒激光进行时间符合测量,信噪比要远远高于利用热辐射的远红外光谱仪;

(3)太赫兹时域光谱的时间分辨性和连续性使

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

得它具有一些独特的应用,如高温材料或过程的光谱、非线性太赫兹发射光谱和光学泵浦 - 太赫兹探针实验。在太赫兹时域光谱出现以前,傅立叶变换光谱法(FTS)在远红外区是最受欢迎的技术。2001年,Han等研究证明,就信噪比而言,THz - TDS在低于 3THz时更高,而 FTS在大于 3THz时更好;

(4)太赫兹时域光谱技术是一种非接触测量技术,同时太赫兹又具有宽带性,能够对半导体和电介质薄膜及体材料的物理信息进行快速准确的测量。

3.3 太赫兹时域光谱技术在中药检测上的应用

中药是具有我国自主知识产权的新药的发现源泉,也是中华民族独具特色,具有潜在源头创新和拥有国际领先地位的药物研究领域。目前对中药质量进行鉴别,主要是运用色谱技术、光谱技术、免疫技术、薄层分析和显微鉴别技术等。太赫兹技术属于光谱技术中的一种,利用太赫兹技术对中药进行鉴别具有以下优点:(1)太赫兹辐射的光子能量很低(1THz对应的光子能量约为 4.1meV),不会对所测中药产生伤害,可以作到无损鉴定;(2)大多数中药所含化学成份的生物分子,其具有的低频振动和转动模式处于太赫兹波段,这使得不同中药具有不同的太赫兹"指纹谱",可以准确地鉴定出中药中不同的化学成份;(3)太赫兹波段处于微波与红外波之间,利用太赫兹技术对中药进行鉴定是对其它光谱技术的一个有效补充,可以起到相互验证的作用;(4)利用太赫兹技术对中药进行鉴定,操作非常简单,可适应在实际中的应用。

我们实验室利用太赫兹时域光谱系统对人工牛黄和天然牛黄,以及中成药安宫牛黄丸分别进行了测量,获得了它们的太赫兹特征光谱。通过分析比较光谱之间的差异,发现人工牛黄和天然牛黄之间存在明显差异,可用于检测牛黄质量的优劣。获得的安宫牛黄丸的特征光谱为建立太赫兹光谱库提供基础数据。

图 5所示的是天然牛黄与人工牛黄的太赫兹吸收光谱图,图 6所示的是安宫牛黄丸的太赫兹吸收光谱图。

如图 5所示,通过两种牛黄的太赫兹光谱的比较可以明显地看出它们之间的差别,天然牛黄不存在吸收峰,而人工牛黄却有三个吸收峰,分别处于 1.200THz, 1.405THz和 1.698THz,这对于鉴别牛黄的品质具有重大意义。安宫牛黄有两个吸收峰,分别处于 0.278THz和 1.098THz,如图 6所示。通过多次实验发现这些吸收峰是确实存在的,利用中药的特征光谱可以辨识出中药的品种,并可用于对中药质量优劣的鉴定。太赫兹时域光谱技术是一门新兴的技术,由于其所具有的低光子能量和操作简便的特点,必将成为在药品检测领域继红外光谱技术之后的又一项有力的光谱检测方法。

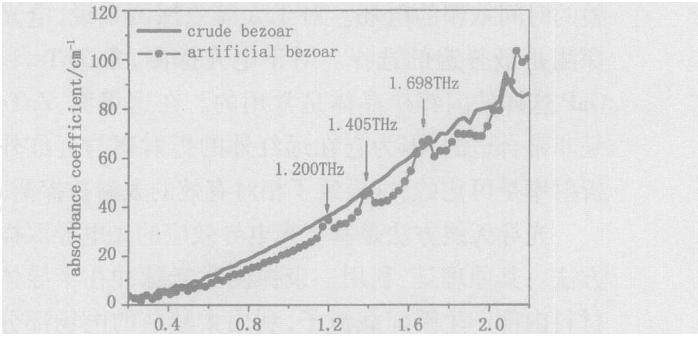


图 5 天然牛黄与人工牛黄得太赫兹吸收光谱

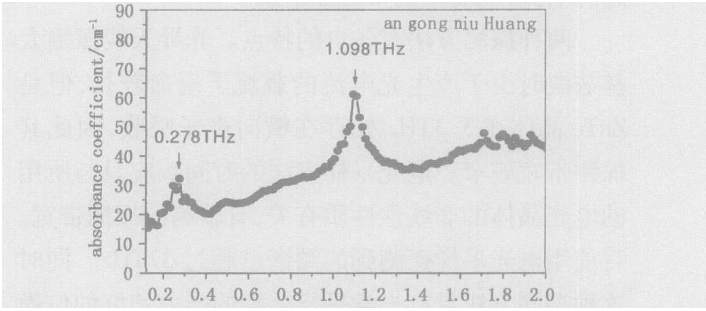


图 6 安宫牛黄丸的太赫兹光谱

4 太赫兹成像技术

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,太赫兹辐射对于电介质材料具有较强的穿透效果,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,这是太赫兹时域光谱的独特优点。此外,太赫兹源的光子能量极低,没有 X射线的电离性质,不会对材料造成破坏。因此,太赫兹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。自从美国的 Hu和 Nuss等人在 1995年首次建立起国际上第一套太赫兹成像装置以来,许多科学家相继开展了电光取样成像、层析成像、太赫兹单脉冲时域场成像、近场成像、暗场成像、收发分置太赫兹成像、三维成像及 T射线 CT等的研究。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

太赫兹成像所依据的基本原理是: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函数的空间分布。将透射太赫兹电磁波的强度和相位的二维信息记录下来,并经过适当的处理和分析,就能得到样品的太赫兹图像。太赫兹成像系统的构成如图 7所示。太赫兹成像系统的构成和工作原理与太赫兹时域谱测试系统相似。太赫兹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)的太赫兹波收集后聚焦到太赫兹探测元件上。太赫兹探测元件将含有位置信息的太赫兹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。

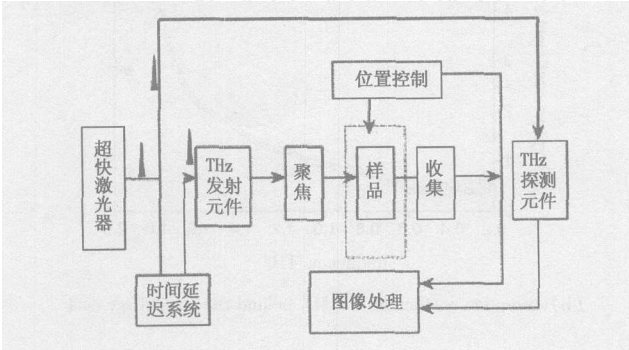


图 7 太赫兹成像系统示意图

太赫兹辐射成像与 X射线成像相比,太赫兹辐射的光子能量极低(只有几个毫电子伏特),可以用来对人体或物品进行无损成像。太赫兹对于电介质材料及塑料、纸箱等包装材料有很强的穿透力,可用来对已经包装的物品进行成像。太赫兹辐射对水的穿透力很差,可以通过测量物质中的水分含量来控制质量,如对于已经包装好的食品,可以通过测定食品的水分含量来确定其新鲜程度。通过对肉制品的太赫兹检测发现,瘦肉对太赫兹辐射吸收很强,而脂肪几乎不吸收太赫兹辐射,利用此特性可以对肉制品进行质检。另外,通过测量太赫兹光谱,不仅可以得到物体光谱的强度(振幅)信息,还可得到其相位信息,因而可以用来对物体进行三维立体成像。目前,太赫兹显微成像的分辨率可以达到几十微米,能清晰地看到皮肤中的肿瘤,可能用于进行皮癌的诊断。

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。

我们所用的太赫兹辐射成像采用的是逐点扫描的方法,按固定步长扫描一定面积的区域内的每一个点,得到它们的时域谱,然后用 Matlab软件处理得到图像。实验装置与测量太赫兹时域谱的装置基本相同,只是用一个沿 X、Y、Z方向移动的平台取代了原来的延迟平台。

第一个样品为装有虫子的木片。将木片凿一个小洞,然后将活的虫子放入小洞里制得样品。无虫处木片厚度约为 4.5mm,有虫处木片厚度约为 2mm。扫描面积为 20mm ×20mm,扫描点间距 0.5mm。实验温度 20℃,湿度 29%。

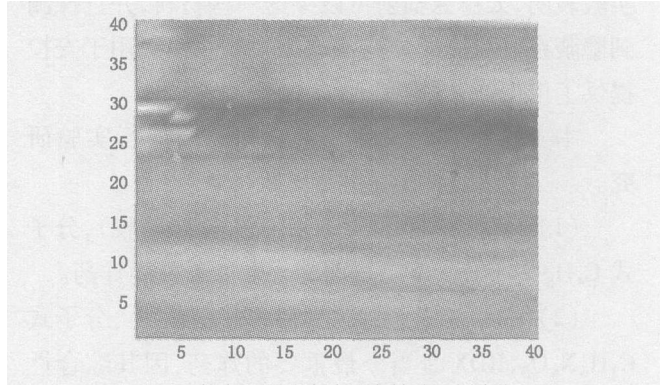


图 8 放有虫子的木片的太赫兹辐射成像图

图 8中纵坐标约在 25～30之间的阴影部分即为虫子的图像。

第二个样品为砖片后放一刀片。将刀片固定于砖片后面制得样品。砖片厚度为 2mm。扫描面积为 20mm ×15mm,扫描点间距为 0.5mm。实验温度 20.5℃,湿度为 33.9%。实验得到图 9所示的图像,图中阴影部分即为刀片的图像。

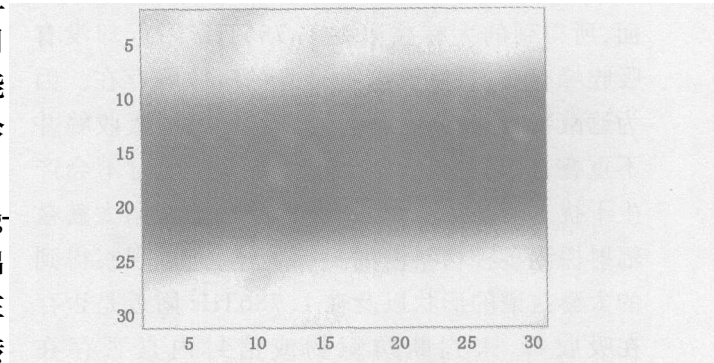


图 9 厚度为 2mm的砖片遮蔽的刀片的太赫兹成像

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于信噪比、扫描点数、系统稳定性等因素影响,实验所得图像的分辨率不高,但是仍然可以看出置于各种材料之后的物品的图像。这证明了太赫兹辐射可以穿过砖片、土片等建筑材料,而得到位于它们后面的物体的图像。这一特点在安全检查方面具有广阔的应用前景。

5 太赫兹辐射在安全检查中的应用

太赫兹辐射在安检和反恐中的应用,有可能对隐蔽的炸药、毒品和生化武器进行探测,甚至对建筑物内的恐怖分子与危险材料进行探测。近几年来,人们对如何利用太赫兹辐射探测炸药等危险物品越来越感兴趣。为此本文选取了两种炸药(HMX、RDX),将它们分别隐蔽在三种材料(迷彩服、普通信封、砖片)后面,运用太赫兹光谱系统对其进行实验研究,得到了这几种隐蔽炸药的吸收系数曲线。实验表明,太赫兹辐射可以穿透一些材料,并且探测到隐蔽在其后面的炸药。这为太赫兹辐射用于安检提供了依据。

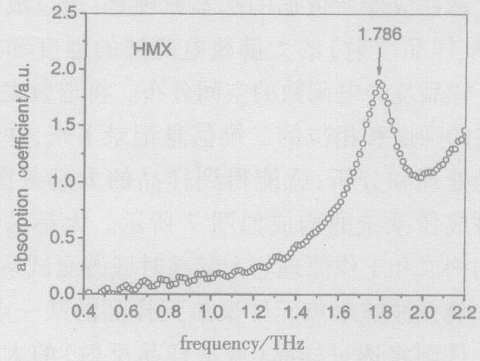
本实验选取 HMX、RDX两种炸药进行实验研究。

(1) HMX:奥克托今(环四亚甲基四硝胺),分子式 $C_4H_8N_8O_8$,HMX是当前综合性能最好的炸药。

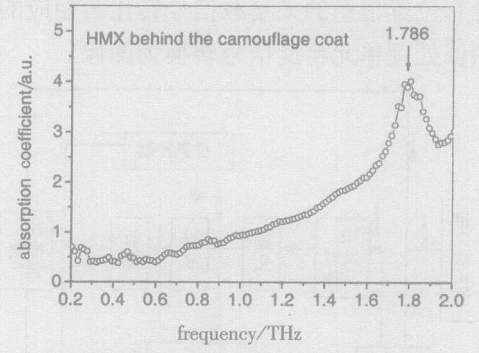
(2) RDX:黑索金(环三亚甲基三硝胺),分子式 $C_3H_6N_6O_6$,RDX是当今最重要的炸药,因其综合性能优良,在许多地方,尤其是导弹中得到广泛应用。

5.1 隐蔽炸药的太赫兹谱

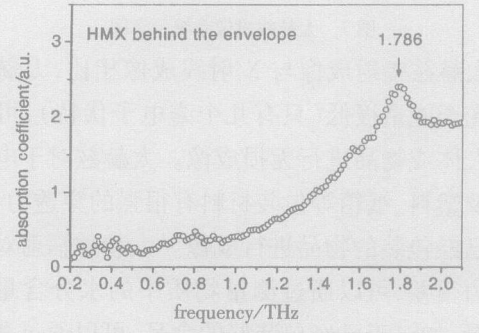
从图 10中吸收系数曲线可以看出,样品 HMX在 1.786THz处存在一个明显的吸收峰。如果将HMX隐蔽在迷彩服、普通信封后面,所得到的太赫兹谱与样品 HMX的太赫兹谱在形状上表现出较大的相似性,并且可以在 1.786THz附近观察到一个明显的吸收峰。而将 HMX隐蔽在石片后面,所得到的太赫兹谱在 1.786THz附近却没有吸收峰存在,只有遮蔽物自身的吸收峰存在。因为遮蔽物自身的吸收峰与 HMX样品的吸收峰并不重叠,所以在对 HMX样品进行探测时不会产生干扰。本组实验结果表明,有可能利用太赫兹辐射探测多种材料内的目标物体,通过观察得到的太赫兹谱的形状以及在 1.786THz附近是否存在吸收峰,来判断纺织物或信封内是否存在HMX炸药。



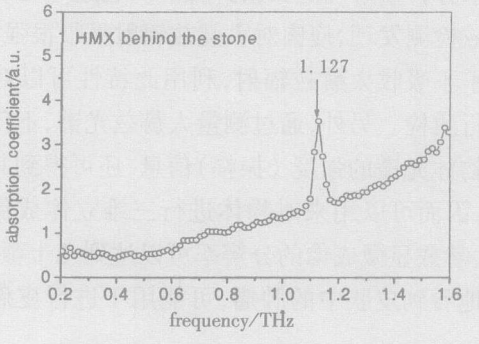
(a) absorption coefficient of HMX



(b) absorption coefficient of HMX behind the camouflage coat



(c) absorption coefficient f HMX behind the envelope



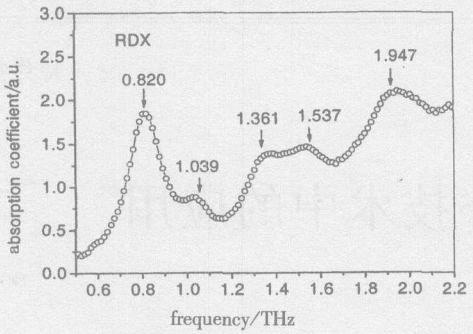
(d) absorption coefficient of HMX behind the stone

(a)是 HMX 的吸收系数曲线;(b)是隐蔽在迷彩服后的 HMX 的吸收系数曲线;(c)是隐蔽在普通信封后的 HMX 的吸收系数曲线;(d)是隐蔽在石片后的 HMX 的吸收系数曲线

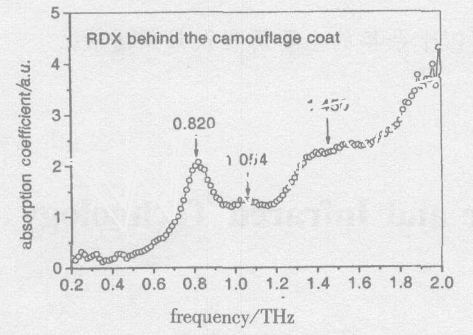
图 10 隐蔽的 HMX 的太赫兹谱

Fig. 10 absorption coefficient of covert HMX

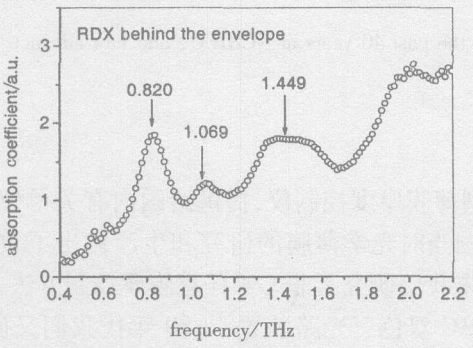
© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



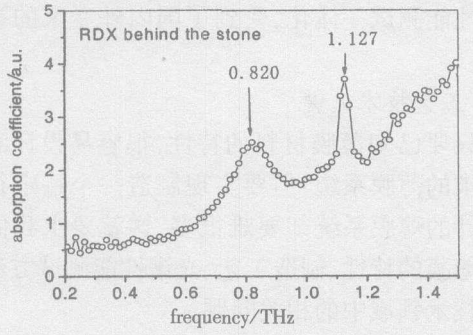
(a) absorption coefficient of RDX



(b) absorption coefficient of RDX behind the camouflage coat



(c) absorption coefficient f RDX behind the envelope



(d) absorption coefficient of RDX behind the stone

(a)是 RDX 的吸收系数曲线;(b)是隐蔽在迷彩服后的 RDX 的吸收系数曲线;(c)是隐蔽在普通信封后的 RDX 的吸收系数曲线:(d)是隐蔽在石片后的 RDX 的吸收系数曲线

图 11 隐蔽的 RDX 的太赫兹谱

Fig. 11 absorption coefficient of covert RDX

从图 11中吸收系数曲线可以看出,样品 RDX 分别在 0.820THz、1.039THz、1.361THz、1.537THz、1.947THz处存在明显的吸收峰。将 RDX隐蔽在迷彩服、普通信封后面,所得到的太赫兹谱与样品 RDX的太赫兹谱在形状上表现出高度的相似性,并且可以分别在 0.820THz、1.039THz、1.361THz附近观察到明显的吸收峰;若将 RDX隐蔽在石片后面,所得到的太赫兹谱与样品 RDX的太赫兹谱在形状上表现出明显的相似性,并且可以在 0.820THz附近观察到明显的吸收峰。本组实验结果表明,有可能利用太赫兹辐射探测多种材料内的目标物体,通过观察得到的太赫兹谱的形状以及在 0.820THz、1.039THz、1.361THz、1.537THz、1.947THz附近是否存在吸收峰,来判断纺织物、信封或建筑材料内是否存在 RDX炸药。

本文的实验结果表明,太赫兹辐射可以穿透多种纺织物、包装材料、建筑材料,并探测到隐蔽在其后面的炸药,因而,将太赫兹辐射用于探测隐蔽的目标物体是可能的。太赫兹辐射对遥感、安全检查和反恐有重要意义,例如探测地面下的地雷,砖、石或木箱内的炸药,人体炸弹,以及建筑物内的人群或装备等。

参考文献:

[1] S Wang, B Ferguson, D Abbott, et al T-ray Imaging and Tomography[J]. Journal of Biological Physics, 2003, 29(2): 247 - 256.

[2] 张蕾,徐新龙,李福利. 太赫兹(THz)成像的进展概况[J],量子电子学报, 2005, 22: 129 - 134.

[3] Zhiping Jiang, X-C Zhang Electro-optic measurement of terahertz field pulses with a chirped optical beam[J]. APPLIED PHYSICS LETTERS, 1998, 72(16): 20.

[4] Q Wu, T D Hewitt, X-C Zhang Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. Appl Phys Lett, 1996, 69(8): 19.

[5] 徐新龙,王秀敏,李福利,等. ZnSe体单晶太赫兹辐射段时域光谱测量及分析[J]. 光学与光谱学分析, 2004, 24(10): 1153 - 1156.

[6] 李福利,沙琳,等. 太赫兹辐射穿地雷达与穿地遥感的概念设计[A]. 第十一届全国光电技术与系统年会,北京, 2005年.

[7] 任荣东,王新柯,赵国忠,等. 太赫兹辐射对建筑材料的穿透特性研究[A]. 第十一届全国光电技术与系统年会,北京, 2005年.

[8] 王新柯,任荣东,赵国忠,等. 太赫兹辐射对包装材料透射特性的研究[A]. 第十一届全国光电技术与系统年会,北京, 2005年.

[9] 张蕾,李福利,刘丽. 几种中药 THz谱初步研究[A]. 2004年全国光学大会(杭州)交流.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net