

太赫兹技术及其在国防与安全领域的应用

李树锋

(中国人民武装警察部队学院基础部 065000)

太赫兹波是指频率介于0.1~10THz之间的电磁波,其波长范围为0.03~3 mm。太赫兹波在电磁波谱中的位置位于微波和红外辐射之间(如图1所示)。由于太赫兹波直接以其频率范围命名,实际上在低频波段与微波重合,在高频波段与红外重合,与之相应,其研究手段也由电子学理论逐渐过渡为光子学理论。所以太赫兹波是宏观电子学与微观光子学的交叉融合区域。

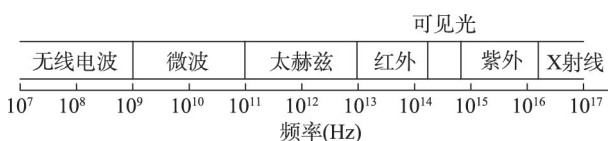


图1 太赫兹波在电磁波谱中的位置

20世纪90年代以前,人们对太赫兹波的认识非常有限,形成了早期研究的空白区,因此人们经常称之为太赫兹空隙(THz Gap)。近年来,随着激光技术、量子阱技术和半导体技术的发展,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机理、检测技术和应用技术等方面的研究得到蓬勃发展。太赫兹波由于在电磁波谱中所处的特殊位置而拥有许多优越的性质,从而在天文、生物、化学等领域有着非常重要的学术和应用价值。尤其在军事和安全领域,太赫兹技术更是有着广阔的应用前景,可以为国家和人民提供更为先进可靠的安全保障技术手段。由此,太赫兹技术得到了各国政府和研究机构的高度重视,成为了当前国防和反恐中的重点研究项目。

1. 太赫兹波的特性

太赫兹波综合了电子学和光子学的优越性能,

具有很多不同于其他电磁波的特殊性质。也正是这些特性,使之成为当前科技界最热闹的前沿领域之一。

指纹特性

物质的太赫兹光谱包含着丰富的分子结构信息。大多物质晶格的振动以及分子的转动和振动能级之间的跃迁都对应于太赫兹波段范围,每一种物质在该波段透射-吸收光谱的位置、强度和形状均不相同。因此太赫兹光谱能反映分子种类和结构的细微变化,使得它们具有类似指纹一样的唯一特点,所以太赫兹光谱也称为分子指纹谱。根据太赫兹光谱的分子指纹特性可以分析研究物质成分、微观结构及其相互作用关系。图2展示了二硝基苯甲醚(DNAN)、六硝基芪(HNS)和二硝基亚甲基-四唑(DNMT)三种军用粉末炸药的太赫兹透射光谱(引自李茜,三种军用炸药的太赫兹光谱研究[M],

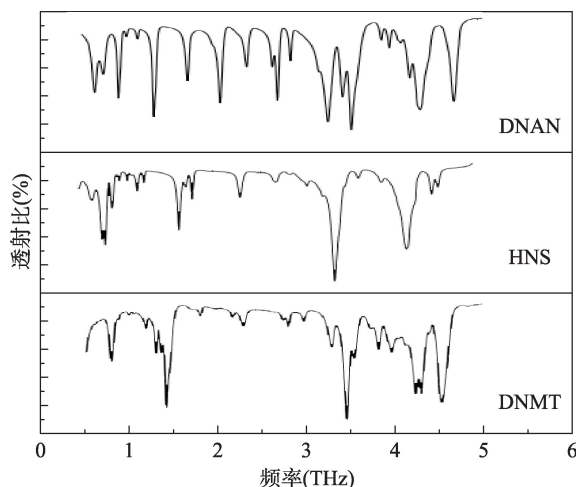


图2 DNAN、HNS和DNMT三种炸药的太赫兹透射光谱

中北大学,2012),可以看出,三种炸药各自都有大量的特征吸收峰,将吸收峰的峰位及强度通过与标准谱对比,很容易能够辨识出物质种类。

透射特性

太赫兹波在各类物质中的传播特性还有待进一步深入研究。但根据已有的研究结果,太赫兹辐射对有极电介质、无极电介质及金属导体的透射性有很大区别。有极电介质由于分子正负电荷的中心不重合,存在等效的电偶极矩,金属导体内部则存在大量自由移动的电荷,两者与太赫兹波相互作用时会出现共振吸收,从而两者对太赫兹波的透过性很低。而无极非金属介质,由于内部不存在自由电荷和等效的电偶极矩,所以对太赫兹波不会产生共振吸收效应,从而具有很强的透过性。由此太赫兹成像可以将不同的材质加以区分。很多包装材料如塑料、纸箱、布料、木材等都属于无极非金属材料,而这些介质对可见光都是不透明的,由此可结合相应技术对不透明的物体进行太赫兹透视成像,作为X射线和超声等成像技术的补充,探测材料内部缺陷和密封包装内的物品。

安全特性

根据光子能量公式 $E=h\nu$,太赫兹波的光子能量只有毫电子伏特的数量级。例如频率为1THz的光子能量为4.1meV,约为X射线光子能量的百万分之一。该能量远低于各种化学键的键能,不会对物体尤其是生物组织引起有害的电离反应。此外,由于极性物质水对太赫兹波有强烈吸收,因此太赫兹辐射无法穿透人体的皮肤,对人体的影响只停留在皮肤表层,非常适用于针对人体或其他生物体的活体检测。

2. 太赫兹技术

太赫兹光谱技术

太赫兹光谱技术利用太赫兹光谱的分子指纹特性研究物质的化学物理性质。将太赫兹脉冲入

射到样品表面,采集透射谱或反射谱,便可以获得与物质作用后太赫兹信号的振幅和相位信息。然后通过傅里叶变换进行相关计算,可以得到样品的光谱信息、吸收系数、折射率等参数。深入分析这些光学参数,就能得到样品的组成元素、内部构造等相关性质。此外,太赫兹光谱也可用于成像系统,能够提供更加丰富的光谱图像。THz光谱对材料所处的状态非常敏感,温度的不同、晶型的不同都会在THz光谱图像中有所反映。

太赫兹成像技术

现代成像技术已经深入到我们生活的方方面面,如工作娱乐中的屏幕成像、气候与地质预报中的大气遥感成像、医学中的X射线、核磁共振和超声成像等。太赫兹技术最近才进入成像领域,目前仍处于起步阶段。太赫兹成像的基本原理是将已知波形的太赫兹波作为成像射线,通过物质反射或透射获取相应强度及相位信息,并经过适当的数字处理和频谱分析,得到目标物体的太赫兹电磁波图像。太赫兹光谱图像不仅包含物质的外观几何信息,而且还包含物质对太赫兹脉冲响应的理化信息。通过对光谱信息进行分析计算,能够得到物质各个像素点上的相关光学参数,为进一步物质成分鉴定、化学结构分析提供了必要的参考。

太赫兹通信技术

太赫兹波处于电子学向光子学过渡的领域,它集合了微波通信与光通信的优点。同时,相比较两种通信手段,太赫兹通信表现出一些特有的性质。

太赫兹波作为微波的延伸,它所提供的通信带宽远大于微波,传输容量更大,速度更快,这是太赫兹通信的最大优势。2013年,太赫兹高速无线通信的速率已经突破100 Gbps。此外,太赫兹由于波束窄,所以方向性更好,可以实现更好的保密性及抗干扰抗截获能力。相对光通信而言,太赫兹由于光子能量低、所以能量效率更高,而且其透过性受烟雾、沙尘等恶劣环境的影响很小。此外,太赫兹频段由于波长较短,因而天线可以做得非常小,能够将设备做成纳米级别,实现纳米级设备之间的通信。

3. 太赫兹在国防与安全领域的应用

太赫兹雷达

太赫兹雷达采用太赫兹为工作波段,实现对目标的测距、测角、测速及成像等功能。与传统微波雷达相比,太赫兹雷达具有一系列独特优势。

首先,太赫兹雷达的波长更短,可以对目标实现高精度成像。太赫兹雷达对运动目标的多普勒频移较大,能有效识别目标的微动特性,对于缓慢移动物体的识别和微细结构检测更有优势。2008年,美国喷气推进实验室(JPL)成功研制了工作频率为0.58THz的三维成像探测系统,该系统的分辨能力可达到亚厘米级。

其次,太赫兹雷达具有反隐身特性。用吸波材料做成的隐形目标只适合于一个很窄的波段,而太赫兹频段具有很宽的带宽,大量的频率分量对隐身吸波材料具有良好的透过率,有利于对隐身目标的探测。对于外形隐身目标,从目标散射中心返回的宽带太赫兹雷达回波携带了不同的角度信息,通过逆合成孔径处理可进行目标成像,从而实现对目标的识别。此外,太赫兹波能够在等离子体中传播。所以不管探测目标采用雷达吸波隐身、外形隐身还是等离子体隐身都对太赫兹雷达“无所遁形”。2012年,中国兵器工业209所研制了用于探测隐身目标的频率为0.89THz的激光器。同时,中国工程物理研究所还将太赫兹雷达和无人机相结合,进行了成像分析。未来太赫兹雷达将会在军事上对现有隐身技术产生颠覆性影响。

再次,太赫兹雷达对大多数非金属材料具有透视性,可以探测到敌方隐蔽的武器、伪装埋伏的武装人员,以及烟雾、沙尘中的军事装备。美国国防部先进研究项目局(DAPRA)从2012年5月开始研发基于视频合成的孔径雷达ViSAR,其工作频段为0.2315~0.235THz,该项目的目标是透过云层、灰尘和其他遮蔽物进行太赫兹成像,并能够定位机动目标。

由于空气与水分子对太赫兹的吸收作用,近距离雷达是目前太赫兹应用的主要方向,可以在抗震救灾的搜救和地下雷场的探测中发挥重要作用。但太赫兹雷达难以应用于远距离探测也成为了最大的缺陷。研制稳定的大功率发射机、高灵敏度的接收机以及降低大气衰减,将是未来解决这一难题的主要方向。近年来,德国应用科学研究所(FGAN)研制的太赫兹成像雷达,其探测距离可达500 m,成像分辨力可达到1.8 cm。

2000年美国陆军国家地面智能中心和马萨诸塞州立大学亚毫米波技术实验室成功研制了1.56THz雷达系统,并用其测试了T80坦克、F16战机等典型战术目标的缩比模型(图3),由缩比模型的测试结果给出了实际目标在太赫兹波段的雷达散射截面,试验证明了利用太赫兹雷达系统测试的散射截面以及成像结果和真实目标实际测试结果吻合很好。

太赫兹军事通信

由于水分子对太赫兹波的吸收作用,太赫兹波



图3 T80坦克和F16战机模型及太赫兹成像结果

传播受空气影响比较大,因此太赫兹通信在地面附近只能用于近距离通信。也正因为太赫兹通信时传输的距离比较短,反而增加了保密性能。在军事作战中,太赫兹通信可以用作专门的隐蔽通信。

对于外层空间,由于没有大气的影 响,太赫兹波则可以无损耗的传输,用很小的功率就可实现远距离通信。因此,太赫兹频段可以广泛应用于太空卫星通信。同时由于太赫兹波束方向性好,具有很强的保密性,可以进行卫星间的高速明码通信。而且太赫兹波穿透大气层能力差,因此星间通信可以免受地面测控的干扰,更为安全。由此可知,太赫兹通信在军事卫星通信中具有很大优势,在现代信息化战争中占有重要地位。

太赫兹安检与反恐

近年来,世界恐怖主义势力日益抬头,为全社会带来极大的安全隐患。公共安全问 题成为了全社会每个成员性命攸关的大事,为各国政府所高度重视。在重要的公共场所对人员进行安全检查是预防公共安全事件、打击恐怖主义最重要的手段之一。目前安检领域常用的方法有X射线法和金属探测法。然而这些方法要么对人体造成一定伤害,只能用于行李、货品检测。要么功能单一,只能报警,无法定位,后续还需要安检人员进行接触性手动搜索。太赫兹技术的兴起,为枪支、刀具、爆炸物或毒品等危险品的安全检查工作提供了一种全新的探测和识别方法。

由于太赫兹对大多数包装物具有透视性,可以实现非接触、非破坏性的探测。太赫兹成像可以有效地检测和识别隐藏在各种遮盖物下的枪支、刀具等武器(如图4所示)。现有金属探测器和X射线安检等设备无法识别的陶瓷刀具、塑料炸药等新型恐袭武器,同样可以利用太赫兹成像技术进行有效检测。太赫兹光谱技术则可以检测隐藏物质的成分,通过特征光谱将爆炸物、毒品等化学生物制剂从分子层次加以识别。太赫兹安检技术将成像与理化分析结合起来,能同时侦测密闭包装内物品的外形与成分,大大提高了安检的可靠性。

2012年中科院电子所设计了0.2 THz聚焦波束

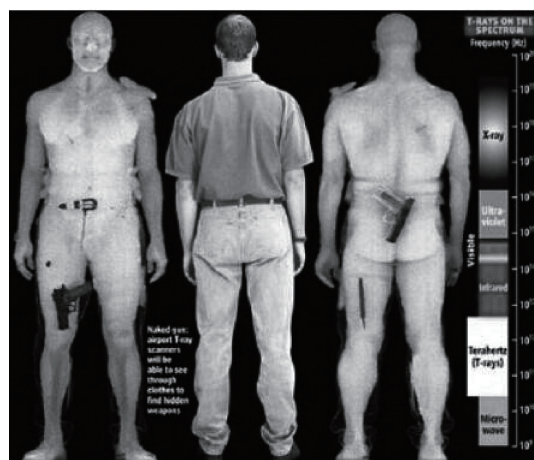


图4 太赫兹探测在安全检查中穿透衣物发现隐藏的武器

扫描成像系统,实现了对人体隐藏危险武器的探测。2014年6月,德国弗劳恩霍夫物理测试技术研究所(IPM)与霍伯纳(Hübner)公司联合研制了太赫兹信件安检设备。这款信件安检设备通过分析透 过信件的太赫兹信号,几秒钟内可确定其太赫兹“指纹谱”,经过与数据库的比对,确定信件内是否存在危险品如爆炸物、细菌、毒品等。近来,北京市THz波谱与成像重点实验室研制开发了太赫兹无损检测装置,采用太赫兹波段的指纹谱对海洛因等12种毒品及RDX等5种爆炸物进行了检验测试。

由于太赫兹光谱能量低,对人体安全,弥补了当前X射线只检物不检人的缺点。将太赫兹成 像用于人体探测,避免了金属探测器对人检测只报警无法定形定位的不足。太赫兹由于具有强穿透性和非电离性,可设计成固定式或移动式探测仪,在机场、车站、码头等人口密集区提供大范围预警(如图5所示)。2014年2月,美国喷气推进实验室研制的工作频率0.6THz的太赫兹探测仪能迅速探测出25米外隐藏武器或爆炸物的人员。特别是美国橡树岭国家实验室(ORNL)和田纳西大学联合开展了“穿墙计划”,利用太赫兹成像技术从外部获得墙内信息。这些研究成果为反恐斗争提供了进一步保障,对社会安全具有重要意义。

此外,太赫兹安检具有快速实时等特点。据了 解,太赫兹安检仪扫描一下就能完成整个人体安检,人均约为1到2秒,是传统安检仪效率的5倍以上。从而达到了快速、安全、准确的效果。



图5 固定式和移动式太赫兹远距离探测示意图

4. 结语

太赫兹技术衔接了宏观经典电磁波理论和微观量子理论,由于独特的性质,在诸多领域有着广阔的应用空间。近年来,太赫兹技术研究发展迅速,应用范围已从基础科学逐渐向武器装备、航空航天、雷达探测、通信、反恐缉毒等方面不断扩展。

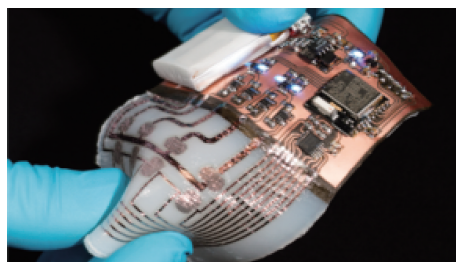
目前,太赫兹技术虽然在军事安全领域取得了一些成果,但仍处于研究和发展阶段,无法达到规模化和实用化。尽管如此,太赫兹独有的特性与优势已向世人展示了其诱人的应用前景,随着对太赫兹技术的深入研究,在不远将来必将会突破理论与技术壁垒,向着远距离、高稳定、小体积、低功耗的方向发展,给将来的国防和安全领域带来更加深远的影响。



科苑快讯

可用于制造弹性电池和软机器人的超级胶水

超级胶水主要用于修理开裂的书架、行李箱轮子,当然还有鞋。但是如果你要粘合非固定的东西,比如在用凝胶垫修补破碎的椎间盘时,迄今为止还没有适用的黏合剂。所以科学家开发出一种新型胶水,可以将软、硬物质和水凝胶粘合在一起,这种果冻状材料可以用于从医疗器械到软机器人的各种东西。以前,这一领域的研究者用紫外光处理黏合剂,但是需要花费1个小时或更长时间,才能将物品表面粘合在一起。现在,一个实验物理小组发明一种新型黏合剂,由超级胶水的主要原料氰基丙烯酸酯(cyanoacrylate)制成,加入有机化合物,均匀散布到粘合物的各个部分,形成坚固的粘合物,而不留任何残渣。非溶剂延迟了胶水的硬化,使加压表面的每一层有充足的时间渗入黏合剂,在几秒内粘合在一起。这种水凝胶黏合剂可以承受1千克重量,伸展幅度达2000%,研究者在《科学进展》(Science Advances)上发表了论文。



这对脊椎病医生和机器人爱好者等人群可是个好消息。新型黏合剂不仅有助于制造章鱼机器人之类的设备,而且还能促进贴在皮肤上的柔软弹性胶布的药物渗透。它还能帮助研究者设计弹性电池和电子皮肤,以及塞满传感器的水凝胶基电子胶布,这种胶布可以记录生命体征并与外部设备交换信息。唯一遗憾的是,这种黏合剂不会在3~5年内上市。

(高凌云编译自2017年6月23日 www.sciencemag.org)