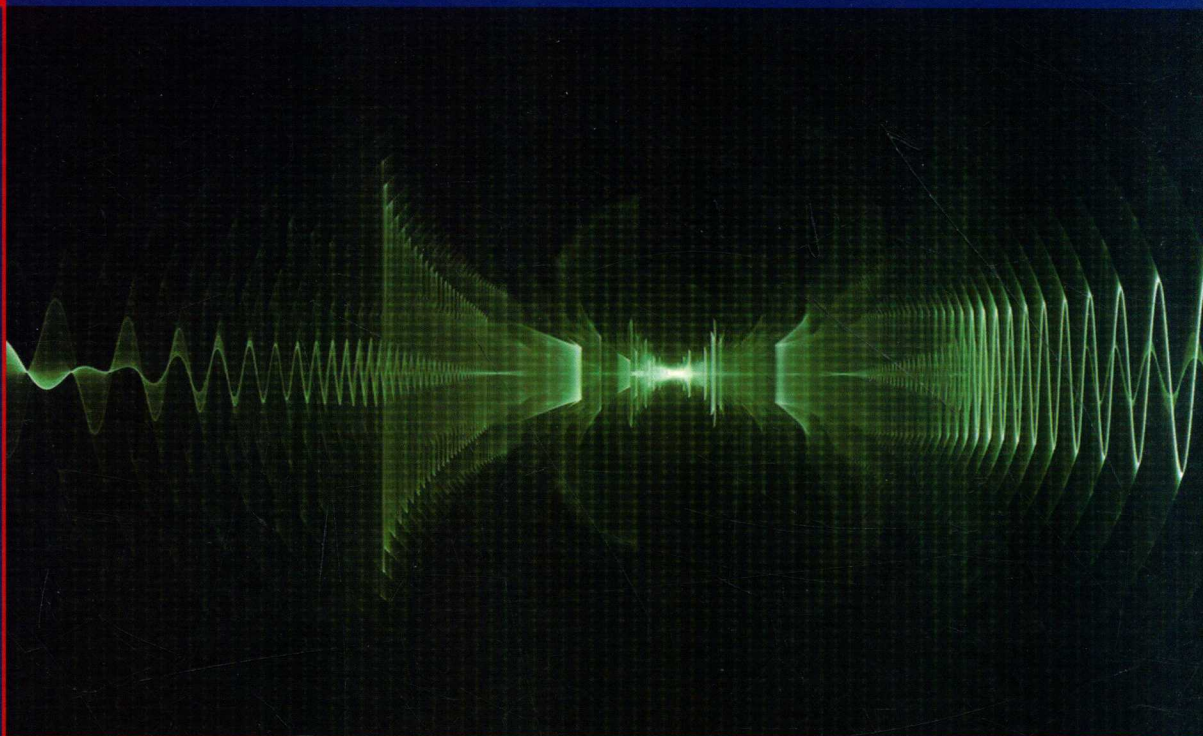




航天科工出版基金资助出版



太赫兹技术发展与应

吴 勤 赵 飞 郭凯丽 张丽平 编著

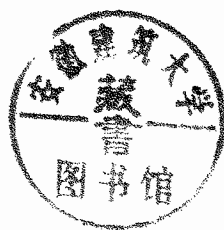


中国宇航出版社

航天科工出版基金资助出版

太赫兹技术发展与应

吴 勤 赵 飞 郭凯丽 张丽平 编著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹技术发展与应用 / 吴勤等编著. -- 北京 :
中国宇航出版社, 2018. 8

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1502 - 9

I. ①太… II. ①吴… III. ①电磁辐射—研究 IV.
①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 184927 号

责任编辑 赵宏颖 封面设计 宇星文化

出版 中国宇航出版社
发行

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)60286808 (010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)60286888 (010)68371900
(010)60286887 (010)60286804(传真)

零售店 读者服务部 (010)68371105

承印 河北画中国画印刷科技有限公司

版次 2018 年 8 月第 1 版
2018 年 8 月第 1 次印刷

规格 787×1092

开本 1/16

印张 14 彩插 2 面

字数 341 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1502 - 9

定价 88.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

前 言

太赫兹技术起源于 20 世纪 60 年代,是电子技术、光学技术、半导体技术、材料技术等多学科、多技术的交叉领域,也是 2004 年美国麻省理工学院评选的“改变未来世界的十大技术”之一。

太赫兹技术所使用的太赫兹波是对特定波段电磁波的统称,是目前电磁波谱中最后一块被人类利用的区域。太赫兹波在物体成像、环境监测、生命科学、医疗诊断、射电天文、宽带无线通信、卫星通信和军用雷达等方面具有重大应用价值和广阔的前景。

太赫兹技术领域的研究主要围绕太赫兹波的产生与探测和太赫兹应用展开。太赫兹波的产生与探测技术是太赫兹各种应用的基础,也是目前限制太赫兹技术应用的瓶颈。太赫兹应用技术主要包括太赫兹光谱技术、太赫兹成像技术、太赫兹通信技术和太赫兹雷达技术。太赫兹光谱和成像技术在安检、生物、医药健康等领域有巨大应用前景,例如太赫兹光谱技术可以检测药品有效成分含量从而对药品质量进行检测,可以检测食品原材料品质从而快速对原材料分级;太赫兹成像技术可以探测包裹中的危险品、筛查癌症、对人体进行安检。太赫兹光谱技术和太赫兹成像技术是目前已经开始商用化的太赫兹应用技术。相比光谱技术和成像技术,太赫兹通信技术和太赫兹雷达技术距离实用化尚有一定距离。尽管目前这两种技术受到太赫兹源、探测器以及环境因素的限制,无法短时间内实用化,但是这两项技术的潜在军事应用价值巨大,吸引了军事强国的关注,如美国喷气推进实验室就研制了多台太赫兹雷达。

由于太赫兹技术有广泛的应用领域和巨大的应用价值,因此太赫兹技术发展备受美国、欧盟、日本等科技强国和组织的关注。自 20 世纪 90 年代中期,美国国家基金会、国家航空航天局、国防部和国家卫生学会等政府和军事部门就对太赫兹项目提供了持续的较大规模的资金支持,太赫兹技术在美国得到了快速发展。随后,欧盟、澳大利亚、日本等国家和组织的企业、大学和研究机构纷纷投入到太赫兹技术的研发之中,欧盟和日本竞相提出各自的大赫兹技术发展规划。

经过 20 多年的发展,目前太赫兹技术正处于一个方兴未艾的时期,太赫兹技术正在从实验室走向商业,从学术走向应用,并已出现了部分商用产品。2014 年 5 月 8 日,在“第九届中国国际国防电子展览会”上,中国电子科技集团公司举办发布会,展示国内研

制的首台商用太赫兹安检仪“博微太赫兹人体安检仪”。这台商用太赫兹安检仪的发布表明，太赫兹技术在中国经过二十几年的发展，已经开始走向商用化。

近年来，太赫兹波以其独特的性能和广泛的应用越来越受到世界各国的关注，已被国际科学界公认为是高科技领域的必争之地，其研究和应用对于未来作战与国家安全具有重大的战略意义。

本书系统地介绍了太赫兹技术的基本概念、特性与基础技术，重点介绍了太赫兹时域光谱、太赫兹成像、太赫兹雷达及太赫兹通信关键技术，全面总结了国内外相关领域技术的最新进展情况，分析了其应用情况及未来应用前景，并对美国国防高级研究计划局太赫兹相关项目进行了梳理。

本书由北京航天情报与信息研究所组织编写，是集体劳动的结晶。在本书的编写过程中，得到了中国航天科工集团有限公司刘石泉、陈国瑛、黄培康、寇志华、刘陈等领导和专家的指导。中国航天科工防御技术研究院、北京航天情报与信息研究所相关领导和专家为本书编写提供了充分的支持和帮助，航天科工图书出版基金为本书提供了资助，在此一并表示感谢。此外，本书参考和引用的一些相关教材、论著等，均列入每章后的参考文献中，但文中未能一一标注，在此谨向有关作者表示衷心的感谢。

尽管编写人员在本书编写过程中，查阅了大量的文献资料，并进行了认真整理、核对、分析、提炼和加工，但由于资料来源不同，加之研究时间、水平与条件所限，本书难免存在错误之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2017年10月

目 录

第 1 章 太赫兹的概念与特性	1
1.1 太赫兹的概念	1
1.1.1 电磁波	1
1.1.2 太赫兹波	3
1.2 太赫兹波的特性	4
1.3 太赫兹技术概况	9
1.3.1 太赫兹技术	10
1.3.2 研究历程	10
1.3.3 发展现状	12
参考文献	18
第 2 章 太赫兹基础技术	19
2.1 太赫兹辐射源	19
2.1.1 光学太赫兹辐射源	20
2.1.2 电子学太赫兹辐射源	32
2.1.3 自旋电子学新型太赫兹辐射源	46
2.1.4 各类太赫兹辐射源比较	49
2.2 太赫兹波探测	50
2.2.1 光电结合探测技术	51
2.2.2 电子探测技术	52
2.2.3 其他探测技术	54
2.2.4 常见太赫兹探测器比较	57
2.3 太赫兹波导技术	57
2.3.1 金属波导	57
2.3.2 金属线波导	58
2.3.3 介质波导	59

2.3.4 光子晶体太赫兹波导	60
2.3.5 太赫兹光子晶体纤维	60
2.4 太赫兹功能器件	60
2.4.1 太赫兹透镜	60
2.4.2 太赫兹偏振器	61
2.4.3 太赫兹滤波器	62
2.4.4 太赫兹调制器	63
2.4.5 太赫兹隔离器	66
2.4.6 太赫兹传感器	67
2.4.7 太赫兹放大器	67
参考文献	70
第3章 太赫兹时域光谱技术	72
3.1 太赫兹时域光谱技术概述	72
3.1.1 太赫兹时域光谱技术原理	72
3.1.2 太赫兹时域光谱技术的特点	74
3.1.3 太赫兹时域光谱系统	74
3.2 太赫兹时域光谱技术研究进展	76
3.3 快速扫描太赫兹时域光谱技术	77
3.3.1 太赫兹单脉冲测量技术	78
3.3.2 快速扫描转动光学延迟线	79
3.3.3 异步光学采样技术	80
3.3.4 基于光纤的延迟线	81
3.4 太赫兹时域光谱技术应用	81
3.4.1 在危险品检测中的应用	82
3.4.2 在空间领域的应用	86
3.4.3 在生物学中的应用	88
3.4.4 在林业研究中的应用	91
3.4.5 在食品检测中的应用	93
3.4.6 在资源勘探中的应用	93
参考文献	97
第4章 太赫兹成像技术	99
4.1 太赫兹成像分类	99

4.2 太赫兹成像方式	101
4.2.1 太赫兹脉冲成像	101
4.2.2 太赫兹时域逐点扫描成像	104
4.2.3 太赫兹实时焦平面成像	105
4.2.4 太赫兹波计算机辅助层析	106
4.2.5 太赫兹连续波成像	108
4.2.6 混合式太赫兹成像	110
4.2.7 太赫兹近场成像	112
4.2.8 太赫兹被动成像	114
4.2.9 太赫兹共焦扫描显微成像	115
4.3 太赫兹成像技术发展现状	121
4.3.1 太赫兹成像技术发展历程	121
4.3.2 太赫兹成像技术限制因素	129
4.4 太赫兹成像技术应用	129
4.4.1 安全检查	129
4.4.2 无损探伤	134
4.4.3 生物医学	135
4.4.4 毒品识别	137
参考文献	138
第5章 太赫兹雷达技术	143
5.1 太赫兹雷达技术优势	143
5.2 太赫兹雷达技术主要内容	145
5.2.1 太赫兹电子学器件	145
5.2.2 太赫兹雷达收发阵列	146
5.2.3 太赫兹雷达目标散射特性测量与计算	147
5.2.4 太赫兹雷达的空间应用及关键指标分析	147
5.3 太赫兹雷达技术发展现状	147
5.3.1 美国大学中太赫兹雷达技术研究	148
5.3.2 美国喷气推进实验室研制太赫兹雷达成像系统	150
5.3.3 西北太平洋国家实验室	152
5.3.4 美国国防高级研究计划局的太赫兹电子计划和视频合成孔径雷达	153
5.3.5 德国和以色列的太赫兹雷达技术研究	155

5.3.6 国内太赫兹雷达技术研究	158
5.3.7 太赫兹雷达成像技术发展现状	159
5.3.8 太赫兹雷达技术的发展瓶颈	161
5.3.9 太赫兹雷达技术发展趋势	162
5.4 太赫兹雷达技术应用研究	164
5.4.1 太赫兹雷达的主要应用现状	164
5.4.2 太赫兹技术在雷达探测领域中的应用	165
5.4.3 太赫兹雷达技术在雷达导引头领域中的潜在应用	167
参考文献	172
第6章 太赫兹通信技术	174
6.1 太赫兹通信技术	174
6.1.1 太赫兹波通信及特点	175
6.1.2 太赫兹波通信系统组成架构	176
6.2 太赫兹通信关键技术	178
6.2.1 太赫兹波辐射源技术	178
6.2.2 太赫兹波信号调制技术	181
6.2.3 太赫兹波信号探测技术	183
6.2.4 太赫兹波脉冲规律	184
6.2.5 太赫兹波通信系统技术	185
6.3 太赫兹通信技术研究	185
6.3.1 太赫兹通信研究计划	185
6.3.2 太赫兹通信技术研究进展	185
6.3.3 国内外研究成果	195
6.4 太赫兹通信技术的应用	196
6.4.1 太赫兹通信技术的应用领域	196
6.4.2 太赫兹通信技术的应用优势及存在问题	199
6.4.3 太赫兹通信技术的应用前景展望	200
参考文献	203
附录 美国国防高级研究计划局太赫兹相关项目	206
参考文献	212
结束语	213

第 1 章 太赫兹的概念与特性

太赫兹波由 Fleming J. W 于 1974 年首次提出^[1], 其定义为频率在 $10^{11} \sim 10^{13}$ Hz ($0.1 \sim 10$ THz) 范围内的电磁波。太赫兹波的辐射能量介于光子与电子之间, 其范围是由电子学向光子学过渡的区域。太赫兹是电磁波谱最后的一块空白之地, 具有独特的优越性及极广阔的应用前景。近年来, 太赫兹波以其独特的性能和广泛的应用越来越受到世界各国的关注, 已被国际科学界公认为是高科技领域的必争之地, 其研究和应用对于未来作战与国家安全具有重大的战略意义。

1.1 太赫兹的概念

1.1.1 电磁波

电磁波有 3 个基本参数, 波长、频率和传播速度。电磁波的波长、频率和传播速度之间存在固定关系

$$\text{电磁波的频率} = \text{电磁波的传播速度} / \text{电磁波的波长}$$

在电磁波的 3 个基本参数中, 频率是电磁波的固有特性, 不会因为电磁波在不同的介质(如真空、空气、水等)中传输而发生变化, 但是电磁波的波长和传播速度在不同介质中会改变。在真空中, 电磁波的传播速度就是光速; 一旦电磁波进入空气、水、玻璃等介质中, 电磁波的波长就会变短、传播速度降低, 但是频率保持不变(由于电磁波进入空气中波长变化非常微小, 通常忽略电磁波在空气与真空中的波长和波速差别)。

鉴于电磁波的频率属于电磁波的固有属性, 一般不发生变化, 因此人们常按频率的不同划分电磁波的种类。目前, 人类所能接触到的电磁波频率从几赫兹到 10^{22} Hz (γ 射线), 覆盖了非常大的范围, 大约有二十几个数量级(每增大 10 倍为一个数量级)。

我们日常所接触的可见光, 是频率范围在 $10^{14} \sim 10^{15}$ Hz 的电磁波; 胸透和安检使用的 X 射线, 其频率范围在 $10^{16} \sim 10^{19}$ Hz; 医用消毒和防晒霜防护的紫外线, 频率范围在 $10^{15} \sim 10^{16}$ Hz; 遥控器上的红外线和武器装备探测的红外线, 频率在 $10^{12} \sim 10^{14}$ Hz; 军事领域常用的毫米波雷达, 指的是波长在毫米范围的电磁波, 频率在 $10^{10} \sim 10^{11}$ Hz; 通信中常用的微波和厨房微波炉发射的微波, 频率在 $10^8 \sim 10^{11}$ Hz, 微波还可以细分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波; 常用的射频无线电, 频率在 $10^5 \sim 10^{11}$ Hz, 可以细分为低频、中频、高频、超高频、甚高频等。图 1-1 将电磁波按频率、波长、用途等制作成一张电磁波谱图。

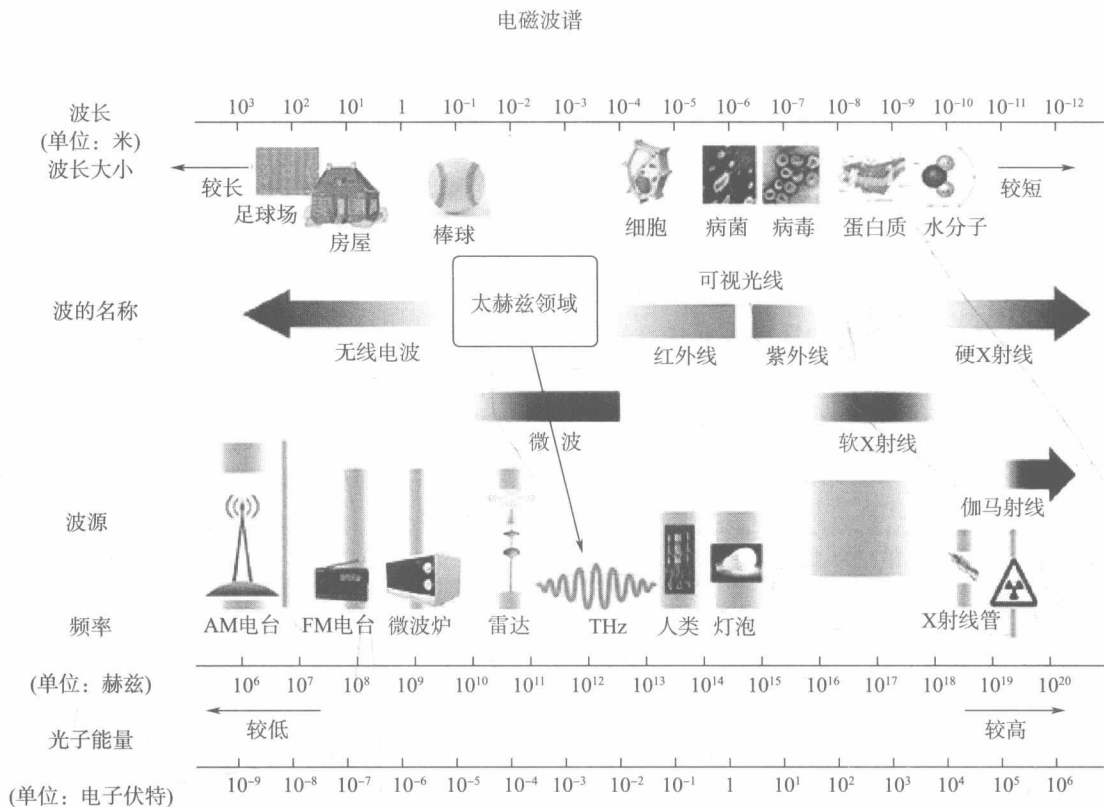


图 1-1 电磁波谱

在太赫兹波段的长波方向是传统电磁学的领域，而它的短波方向则是光学的研究范围。在这两个领域中，电磁波波源的工作方式、操作电磁波所应用的元器件及描述其与物质相互作用的物理表述等都有很大的不同，如表 1-1 所示。

表 1-1 电磁波和光波研究的比较

	电磁学	光学
称谓	电磁波	光波
遵循定律	麦克斯韦方程	薛定谔方程
发射	电荷的经典运动	电子的量子跃迁
检测物理量	电场强度	光强(功率)
应用元器件	电路、天线、波导	透镜、反射镜、光纤
近似方法	均匀电磁场	均匀介质

低频电磁波的发射来源于电荷的宏观运动。当电磁场的振荡频率达到太赫兹波段时，一些在低频可以忽略的效应的影响越来越显著。因此，一些经典的电磁波源和电子元器件

无法适用于太赫兹波段,必须开发更快速和尺度更小的电子元器件来满足该波段的需要。对于低频的电磁波,由于电磁波的波长一般远大于操作该电磁场的元器件的尺寸,因此在处理电磁场与元器件相互作用时,可以把电磁场看作是均匀的。

光波来源于电子的量子跃迁,相当于太赫兹辐射光子能量的两个能级之差只有毫电子伏。这一能级差甚至小于大多数晶体光学声子的能量,因此受到热弛豫效应的严重影响。要获得这一波段高效率的光源,必须有效地避免热弛豫效应的影响,比如采用稀薄气体或低温冷冻的固体等作为激光媒质。由于光学元器件的尺寸远大于光的波长,所以在研究光学问题时,不再假设光场是均匀的,而是认为介质在光学波长范围内是均匀的。

1.1.2 太赫兹波

太赫兹波的频率范围是 $10^{11} \sim 10^{13}$ Hz,为了便于记录,人们将 10^{12} Hz定义为太赫兹(英文缩写 THz),其他定义包括: 10^3 Hz=千赫兹(kHz)、 10^6 Hz=兆赫兹(MHz)、 10^9 Hz=吉赫兹(GHz)。太赫兹波的频率范围在 $0.1 \sim 10$ THz,波长大概在 $0.03 \sim 3$ mm。根据定义,太赫兹波的频率范围可以写成 $0.1 \sim 10$ THz,太赫兹波就是以频率的太赫兹单位命名的电磁波。自然界广泛存在太赫兹射线,如周围的大多数物体的热辐射都有太赫兹辐射,宇宙背景辐射的频谱也大部分都在太赫兹频段。

太赫兹波或称为太赫兹射线,是20世纪80年代中后期才被正式命名的。在此以前太赫兹在不同的领域有不同的名称,在光学领域被称为远红外,而在电子学领域,则称其为亚毫米波、超微波等。太赫兹波位于红外和微波之间,处于宏观电子学向微观光子学的过渡阶段。由于处于交叉过渡区,太赫兹波既不完全适合用光学理论来处理,也不完全适合用电子学的理论来研究。所以仅仅利用电子学或光学的技术和器件都不能完全满足太赫兹波的需要。只有结合两方面的知识,开发全新的技术和元器件,以适应太赫兹波独特的性质,才能对该波段的电磁波进行深入研究和开发利用。

过去很长一段时间,太赫兹波段两侧的红外和微波技术发展相对比较成熟,但是人们对太赫兹波段的认识仍然非常有限,是人类目前尚未完全开发的电磁波谱“空白”区。这主要是由于缺乏太赫兹波段的高效率的发射源和灵敏的探测器。与之相对的在电磁波谱中位于太赫兹波两侧的微波和红外辐射则早已经被广泛地应用在通信、探测、光谱、成像等众多领域。随着科学技术的不断进步,尤其是超快光电子技术和低尺度半导体技术的发展,与太赫兹波相关的技术、产品快速发展,“太赫兹空白”的说法逐渐消失^[2]。图1-2所示为不同频率电磁波的应用示例^[3]。



图 1-2 不同频率电磁波的应用

1.2 太赫兹波的特性

太赫兹波性能独特, 蕴含巨大的应用潜力, 应用前景广阔。太赫兹技术之所以引起科学界广泛的关注, 是由于太赫兹波位于宏观电子学与微观光子学的过渡区, 具有很多独特的性质。太赫兹频率上要高于微波, 低于红外线; 能量大小则在电子和光子之间, 与其他频率的电磁波相比, 具有很多独特的性质。

太赫兹波在电磁波谱中所处的特殊位置, 使其具有一系列特殊性质^[4], 引起了人们广泛的关注。太赫兹波在频域上处于电子学向光子学的过渡领域, 兼有宏观经典理论和微观量子理论的双重特性: 太赫兹波的光子能量很低, 不会对物质产生破坏作用; 这一波谱区域的频谱极宽, 覆盖了包括凝聚态物质和生物大分子在内的转动和集体振动频率。太赫兹波的这些独特性质使它具有重要的应用前景, 未来有可能在探测、通信等领域取得重大突破。太赫兹波的主要特性包括指纹谱、低光子能量、高穿透性、水分子吸收、高带宽和短波长等^[5-9]。表 1-2 所示为太赫兹波的主要特性及其应用领域。

表 1-2 太赫兹波的特性、优势及应用

特性	优势	应用
指纹谱	许多有机大分子在太赫兹波段有独特的吸收谱	分子鉴别、物质成分检测、化学成分测量等
低光子能量	避免破坏分子键	生物活体样品无损检测
高穿透性	陶瓷、塑料等包装材料对太赫兹波吸收较少,金属、爆炸物等物品对太赫兹波吸收较强	穿透包装材料检测危险品
水分子吸收	太赫兹波易被水分子等极性分子吸收	检测样品水含量和水分布
高带宽	太赫兹波带宽大,可以划分出许多高带宽的信道	高速率数据无线通信
短波长	太赫兹波波长短,极限分辨率高	高分辨率成像
瞬态性	有效抑制背景辐射噪声干扰,得到高信噪比的太赫兹时域谱	及时观察极快的物理和化学过程
相干性	直接测量出电场的振幅和相位	方便地提取样品的折射率,吸收系数

指纹谱特性。类似人类的指纹,化学分子也有其独特的光谱特征,称为指纹谱。人们可以通过指纹锁定罪犯,是因为指纹具有唯一性(特殊情况除外);同样,化学分子的光谱特征也具有唯一性。利用太赫兹波照射待测样品,获得样品的吸收谱,并与已知的化学分子的太赫兹吸收谱进行比对,可以确定样品中包含的化学物质成分。太赫兹时域光谱仪就是一种可以测量样品太赫兹吸收谱的设备,非常适合进行材料鉴别工作。根据样品的太赫兹吸收谱,研究人员不仅可以确定样品的化学成分,还可以分辨分子形貌、研究分子构型等,为缉毒、反恐、排爆等应用提供相关的探测技术。图 1-3 所示为两种结构不同的丙氨酸分子的太赫兹吸收谱,从吸收谱上可以明显区分两者。

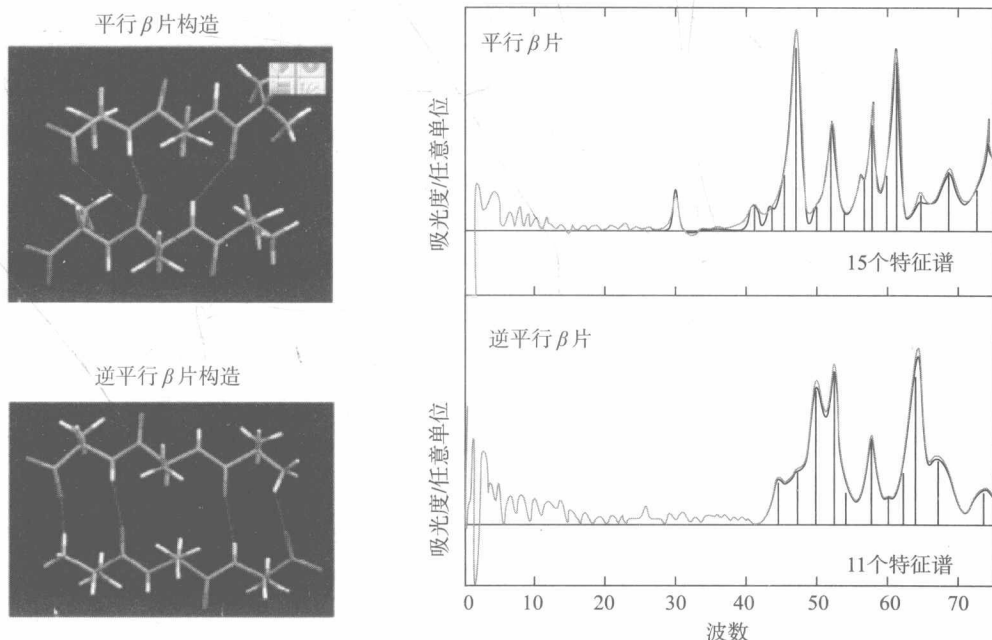


图 1-3 两种结构不同的丙氨酸分子的太赫兹吸收谱

低光子能量特性。太赫兹波是电磁波，具有波粒二象性，根据爱因斯坦提出的光子能量公式，频率 1 THz 的太赫兹波光子能量为 4.1 meV，这个能量仅为 X 射线光子能量的 $1/10^8 \sim 1/10^7$ ，低于许多分子中化学键的键能。因此利用太赫兹波照射这些材料时，不会导致分子化学键吸收太赫兹光子的能量而断裂，损坏检测物质，非常适用于无损检测。相反，由于 X 射线的光子能量很高，可以打断分子键甚至导致原子电离，可能永久损坏被测物品，因此 X 射线不适合用于需要进行无损检测的场合。在医疗领域中，胸透、计算机辅助层析成像扫描设备都使用了 X 射线源，如果人体长期接受这些设备检查，会导致体内细胞中的分子，比如脱氧核糖核酸（DNA）分子，吸收 X 射线光子发生变异，导致如癌症之类的疾病。同样，在核裂变过程中，原子会释放多种高能光子，如 γ 射线、 α 射线等，这些高能光子同 X 射线光子一样，都会破坏人体中重要分子的结构，导致变异生病，著名物理学家居里夫人就是长期接触高能放射线从而罹患癌症去逝的。由于太赫兹波的光子能量较低，到目前为止还没有发现低剂量太赫兹辐射对人体有任何副作用，因此可以用于安全检查。表 1-3 所示为部分物理化学现象所需要的光子能量，可以看出太赫兹波的光子能量低于大多数理化现象。

表 1-3 部分物理化学现象所需能量

理化现象	需要能量/eV	电磁波频率/Hz	产生源
原子电离	≈ 10	$> 10^{13}$	γ 射线, X 射线, 紫外线
电子激发	1.5~10	10^{15}	Γ 射线
共价键断裂	5	10^{15}	可见光
构像变化	0.4	10^{14}	γ 射线
氢键	0.08~2	$10^{13} \sim 10^{15}$	太赫兹, 可见光
热激发	0.026	5×10^{15}	太赫兹, 微波

高穿透性。太赫兹波对许多介电材料和非极性物质具有良好的穿透性，例如陶瓷、硬纸板、塑料制品、泡沫等，这些材料对太赫兹波的吸收非常弱。太赫兹波在照射到由这些材料构成的物体时，可穿透这些物体。相反，太赫兹波对一些金属材料构成的物品不具有穿透性，太赫兹波照射到这些金属物品时会发生反射或吸收。利用这种特性制成的太赫兹成像设备，可以对隐藏在包装材料中的物品进行透视成像，例如行李、包裹等，从而发现隐藏在行李、包裹中的金属制品，如刀、枪等。太赫兹波的这种特性在安检、反恐领域有重要的应用价值。目前，国际上已经开始利用太赫兹的这一特性，检查邮件和识别毒品以及对航天飞机的无损探伤。另外，太赫兹在浓烟、沙尘环境中传输损耗很少，是火灾救护、沙漠救援、战场寻敌等复杂环境中成像的理想光源。

水分子吸收特性。太赫兹波对极性分子穿透性较差，特别是水分子，待测样品中的水分子对太赫兹波有强烈的吸收作用。图 1-4 所示为水分子的极性示意图。在水分子中，由于氧原子的原子核（由 8 个质子和 8 个中子构成）较大，对电子的引力较强，因此氢原子（由 1 个质子构成）的外层电子受氧原子引力作用，偏向氧原子，因此氧原子获得较多电子而呈现负电荷，氢原子失去电子呈现正电荷（质子带正电），整个水分子对外呈现出

电极性。利用太赫兹波不易穿透含水物体的特性,可以通过太赫兹成像仪观察生物组织的水含量分布,分辨生物组织的不同状态,比如生物组织中脂肪和肌肉的分布。在太赫兹成像中,因为不同组织含水量不同,太赫兹波的穿透程度不同,在最终的图像上呈现出颜色差别,可以据此区分不同的组织。图1-5所示为猪的3种不同组织的太赫兹吸收谱,图1-5(a)从左到右分别是猪的脂肪组织、肌肉组织和表皮组织;图1-5(b)是无样品时的太赫兹光谱(作为标准谱与组织的吸收谱对比)和3种不同组织的太赫兹吸收谱。与标准太赫兹光谱相比,脂肪组织的含水量少,其太赫兹吸收谱与标准谱相比差别较小,而肌肉和表皮组织因为含水量多,对太赫兹波吸收比较严重,所以其吸收谱与标准谱相差较大。利用这种技术,医生可以诊断人体烧伤部位的损伤程度(烧伤越严重,组织失水就越严重,太赫兹穿透效果明显);植物学家可以掌握植物叶片组织的水分含量分布等。

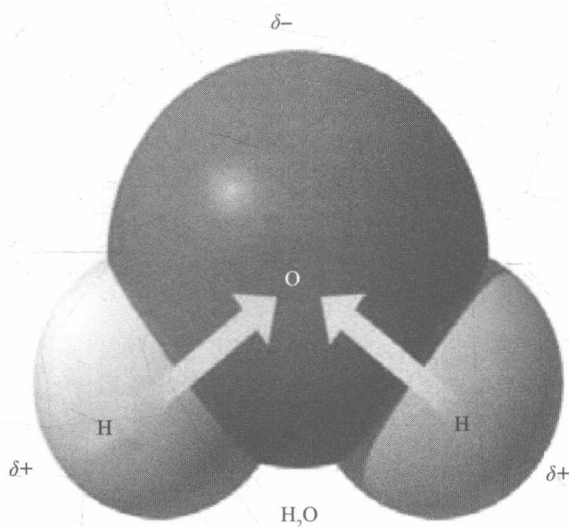
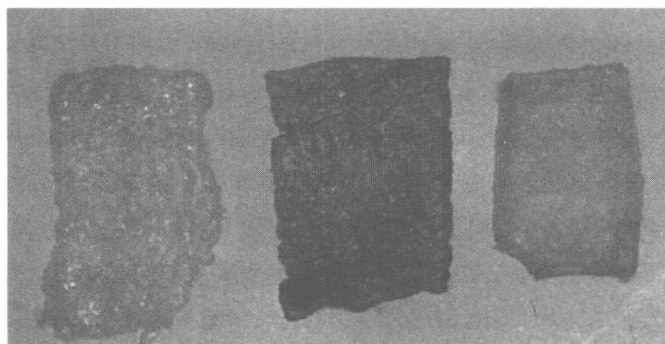


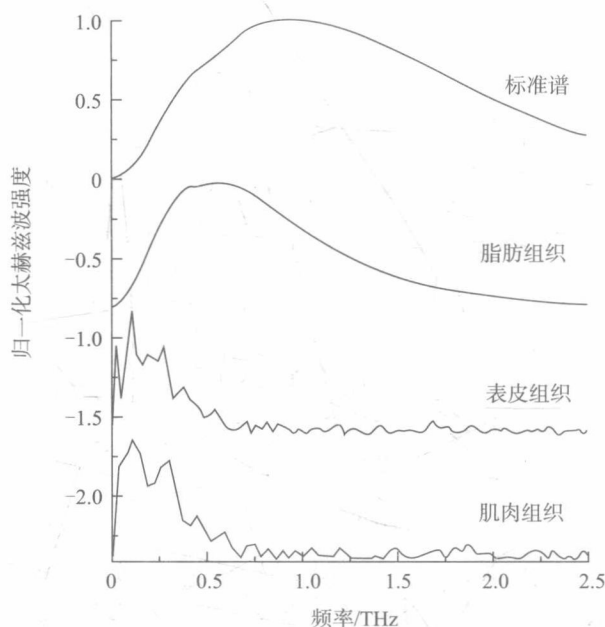
图1-4 极性分子示意图

高带宽特性。与低频电磁波相比,太赫兹波段频率资源丰富,频率范围从 $10^{11} \sim 10^{13}$ Hz,足有近10 THz宽。现有高速无线数据网络的载频在几个吉赫兹内,频带宽度仅为兆赫兹级,因此在太赫兹通信技术中,10 THz的带宽可以划分出最多10 000 GHz的载波频点,即一个太赫兹通信系统的基站可以同时支持近10 000 GHz通信终端进行高速数据通信(如视频通话)。

短波长特性(高分辨率特性)。与毫米波相比,太赫兹波的波长更短,因此利用太赫兹波对目标进行成像时,成像分辨率更高,能够更清晰地分辨目标物体。图1-6所示为成像分辨率与照射波长关系的简单示意图,篮球代表波长较大的光子(如毫米波、微波、无线电波),用篮球穿过字母E(篮球被字母E挡住),结果就是一片空白。随着波长不断减小(从网球、糖豆减小到珠子),穿过字母E的光子波长越来越短(如可见光、紫外线、X射线),而被字母E阻挡的光子越来越少,字母E的成像越来越清晰。图1-7为使用太赫兹成像与常规成像的效果比较。



(a) 猪的脂肪、肌肉、表皮组织



(b) 3种组织的太赫兹吸收谱

图 1-5 猪的脂肪、肌肉、表皮组织太赫兹吸收谱

瞬态性。太赫兹脉冲的典型脉宽在皮秒量级，可以很好地满足时间分辨的研究条件，并且能够有效抑制背景辐射噪声干扰，得到高信噪比的太赫兹时域谱。很多物理和化学过程，如能量传递和荧光寿命以及电子在水中溶剂化等，仅需 10^{-8} s 就能完成，只有在皮秒脉冲实现后才有可能及时地观察这些极快的过程。

相干性。太赫兹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效应（差频）产生。太赫兹相干测量技术能够直接测量出电场的振幅和相位，可以方便地提取样品的折射率、吸收系数，与利用 Kramers - Kronig (K - K) 关系来提取材料光学常数的方法相比，大大简化了运算过程，提高了可靠性和精度。