

DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2010.06.003

太赫兹技术及其应用

姚建铨

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘 要: 太赫兹 (Terahertz THz) 通常是指频率在 0.1~10 THz (波长为 0.03~3 mm) 的电磁波。太赫兹技术被认为是国际电子和信息领域的重大科学问题, 是连接宏观电子学和微观波长学的桥梁, 在电子、信息、生命、国防、航天等方面蕴藏着巨大的应用前景, 目前已经在全世界范围内形成了一个 THz 技术研究高潮。介绍了太赫兹波的主要特征、主要研究内容及其应用前景。
关键词: 太赫兹; 通信; 生物医学
中图分类号: TN201 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-825X(2010)06-0703-05

Introduction of THz wave and its applications

YAO Jian-quan

(Institute of Laser & Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: Terahertz (THz) lies between far infrared and microwave in electromagnetic spectrum with frequency from 0.1 to 10 THz. Terahertz is believed to be the master technology of international electronics and information science, and to be the bridge between micro electronics and macro wavelength. THz contains great prospect in the electronic information, life, national defense, aerospace, etc. and has formed a worldwide research climax. This article introduces the main character, primary researchs and applications of Terahertz.
Key words: Terahertz (THz); communication; biomedicine

0 引 言

随着现代科学技术的迅猛发展、国际竞争的加剧以及社会信息化进程不断加快, 各种各样的新技术、新思想大量涌现出来。从云计算到物联网, 从激光到太赫兹技术的出现都给了我们很大的机遇, 同时也存在一定的挑战。为在国际竞争中立于不败之地, 我们国家在“十二五”战略性新兴产业发展重点中提出了应大力发展信息产业、生物产业、航空航天产业、新能源产业、新材料产业、节能环保产业、新能源汽车产业等新型产业, 另外国家还确定了 5 项科技领域, 它包括能源与环境、信息及先进制造、生命与健康、空天与海洋 (主要包括三深: 深空、深海、深地) 以及重大交叉学科。而太赫兹技术将在这些领域的探索及应用中起到举足轻重的作用。

太赫兹 (Terahertz THz) 通常是指频率在 0.1~10 THz (波长为 0.03~3 mm) 的电磁波。如图 1 所示, 它的长波段与毫米波 (亚毫米波) 相重合, 其发

展主要依靠电子学科学技术; 而它的短波段与红外线相重合, 其发展主要依靠光学科学技术, 可见太赫兹波是宏观电子学向微观光子学过渡的频段, 在电磁波频谱中占有很特殊的位置。但长期以来由于缺乏有效的太赫兹辐射产生和检测方法, 导致太赫兹频段的电磁波未得到充分的研究和应用, 被称为电磁波谱中的“太赫兹空隙 (THz gap)”。

1 国内外研究现状

由于 THz 所处的特殊电磁波谱的位置, 它有很多优越的特性, 有非常重要的学术和应用价值, 使得 THz 受到全世界各国政府的支持, 并给予极大的关注。美国、欧州和日本尤为重视。

1) 美国: 2004 年美国把 THz 作为改变未来世界的十大技术之一, 并于 2006 年把其列为国防重点科学。在美国包括常青藤大学在内有数十所大学都在从事 THz 的研究工作, 特别是美国重要的国家实验室, 如 LINL, IBNL, SLAC, JPL, BNL, NRL, ALS, ORNL 等, 另外还有一些公司如 Bell, IBM 等都在开展 THz 科学技术的研究工作。美国的政府机构如: 美国国家基金会 (NSF)、国家航天局 (NASA)、能源部

收稿日期: 2010-10-15
。 本文根据姚建铨院士在重庆邮电大学 60 周年校庆报告整理, 文中涉及的内容是姚院士研究所学科组的部分工作。

(DOE)和国家卫生学会 (NH)等从 20 世纪 90 年代中期开始对 TH 科技研究进行大规模的投入。目前

已经研究出的标志性成果是 0.225 TH 机载雷达。

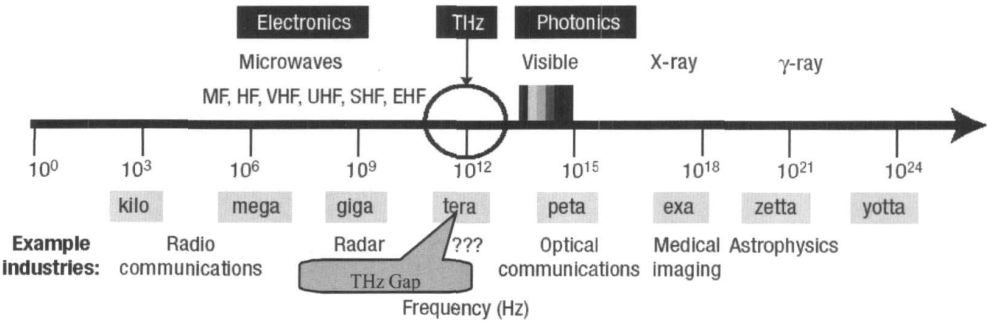


图 1 TH 在电磁波谱中的位置

Fig 1 Position of THz in the electromagnetic spectrum

2) 欧洲: 英国的 Rutherford 国家实验室, 剑桥大学、里兹大学、Strathclyde 等十几所大学, 德国的 KFZ BESSY Karlsruhe, CERN Hamburg 及若干所大学, 都积极开展 TH 研究工作。欧洲国家还利用欧盟的资金组织了跨国家的多学科参加的大型合作研究项目。在俄国国家科学院专门设立了一个 TH 研究计划, IAP IGP 及一些大学也都在积极开展 TH 研究工作。另外制定的研究主题主要有 TH 辐射成像 (2004—2008 年)、分子生物学研究 (2004—2009 年)、TH 空间天文学 (2005—2009 年)、TH 遥感 (2005—2012 年)、光子带隙材料 (2004—2009 年)、微机械探测器 (2006—2015 年), 其标志性成果是研制出 TH 远距离检测系统 (2006 年重大项目)。

3) 亚洲: 在亚洲国家和地区, 韩国国立汉城大学、浦项科技大学、国立新加坡大学、台湾大学、台湾清华大学等都积极开展 TH 研究工作, 并发表了不少有分量的论文。2005 年元月, 日本把太赫兹技术确立为今后十年内重点开发的“国家支柱技术十大重点战略目标”之首, 并列入日本政府从 2006 年开始到 2010 年结束的第 3 期科学技术基本计划予以支持。东京大学、京都大学、大阪大学、东北大学、福井大学以及 SLIS, NTT Advanced Technology Corporation 等公司都大力开展 TH 的研究与开发工作。日本在研制太赫兹技术的标志性成功是 2006 年研制出 1.5 km 的 TH 无线通信演示系统, 完成世界上首例 TH 通信演示。

除此之外, 日本还与欧美合作, 成立 ALMA 计划, 建设全球最大的射电天文亚毫米波干涉阵, 计划投资 10 亿美元, 每年开展三方研讨会, 该计划受到欧美日政府的高度重视。

我国政府在 2005 年 11 月专门召开了“香山科学会议”, 邀请国内多位在 TH 研究领域有影响的院士专门讨论我国 TH 事业的发展方向, 并制定了我国 TH 技术的发展规划。我国的 TH 学科研究受到政

府和各研究机构的广泛重视。国家科技部、国家自然科学基金委、863 计划 (民口和军口) 及第 270 次香山科学会议等都将太赫兹科学技术列为研究主题。

2 TH 辐射的主要特征

TH 科学技术综合了电子学与光子学的特色, 涉及物理学、化学、光学、材料科学、微波毫米波电子学等学科, 是一个典型的交叉前沿科学, 也是一种新的、有很多独特优点的辐射源。它之所以能够引起人们广泛的关注, 首先是因为物质的太赫兹光谱包含着非常丰富的物理和化学信息, 所以研究物质在该波段的光谱对于物质结构的探索具有重要意义; 其次是因为太赫兹脉冲光源与传统光源相比具有很多独特的性质。

1) 光子能量和黑体温度很低, 不同波长电磁波的能量和黑体温度如表 1 所示。

表 1 不同波长电磁波的能量和黑体温度
Tab 1 Electromagnetic energy and Blackbody temperature

number	length/ μm	Frequency/ THz	Energy/ meV	Temp/K
1 cm^{-1}	10 000	0.03	0.12	1.5
10 cm^{-1}	1 000	0.3	1.2	15
33 cm^{-1}	300	1	4.1	48
100 cm^{-1}	100	3	12	140
200 cm^{-1}	50	6	25	290
670 cm^{-1}	15	20	83	960

2) 许多生物大分子, 如有机分子的振动和旋转频率都在 TH 波段, 所以在 TH 波段表现出很强的吸收和谐振。

3) TH 辐射能以很小的衰减穿透物质如陶瓷、脂肪、碳板、布料、塑料等, 因此可用其探测低浓度极化气体, 适用于控制污染。TH 辐射可无损穿透墙壁、布料, 使得其能在某些特殊领域发挥作用。

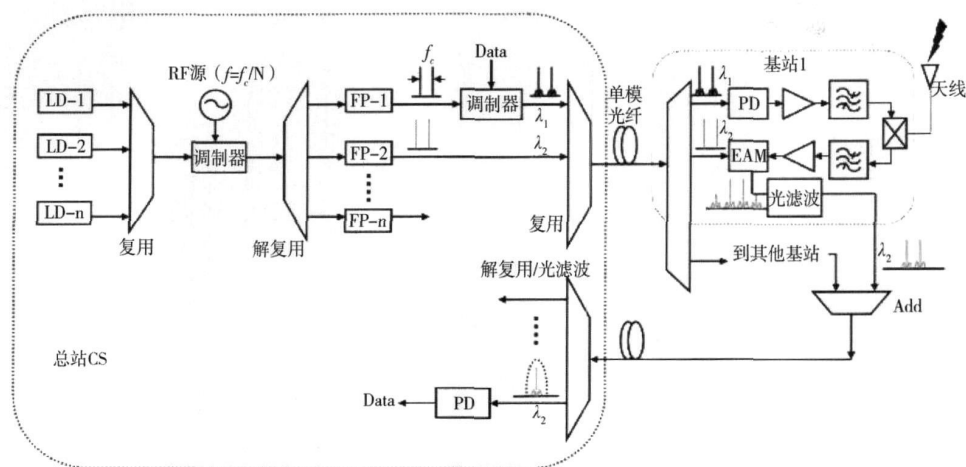


图 6 光载 THz 通信系统

Fig 6 Communication system of THz on optical carrier

4 TH 的应用

由于太赫兹的频率很高, 所以其空间分辨率也很高; 又由于它的脉冲很短, 所以具有很高的时间分辨率。由此, 太赫兹成像技术和太赫兹波谱技术构成了太赫兹应用的两个主要关键技术。太赫兹的独特性能给公共安全、环境探测、生物医学、天文观测、军事及通信等领域带来了深远的影响。

4.1 公共安全

TH 的强透射能力和低辐射能量以及国家在公共安全检测方面的重大需求, 比如检测毒品, 以及在要害部门、场所的安全监控, 如机场安检, 使得 THz 辐射有望成为一种新的公共安全监控技术。由于 TH 既可以用于成像, 又可以用于波谱分析, 且其穿透能力极强, 所以可以用其来实现非接触、非破坏性的探测。通过 TH 我们不仅能够检测出携带有武器的乘机者, 还可以检测旅客携带的特殊物品。另外危险爆炸品, 非法走私物品和无害的化妆品, 也可以通过太赫兹来进行区分。科学家们曾预测, 在不久的将来, TH 成像技术将成为机场、车站及海关等公共场所安全检查的新手段。

此外, 一些分子吸收谱落在 TH 频段内, 且大部分物质对 TH 波具有独特的响应和显征。因此我们可以通过测定“炭疽热”粉末对 TH 电磁波的吸收来得到“炭疽热”粉末成像, 并用于对抗生物恐怖活动。为了准确地辨别, 需要对样品的 THz 响应进行全面地分析。另外 THz 在国土安全检测方面也有一定的应用价值。

4.2 环境探测

TH 技术能够对固体、气体、液体及火焰等介质的电学、声学性质及化学成分进行研究。科研人员可利用 TH 穿透烟雾来检测出大气中的有毒或有

害分子, 因此可用于环境的污染检测。由于 TH 波同样能够被大气层中的水、氧气、氮化物等物质所吸收, 我们可以通过卫星携带的 TH 探测器来实现对大气中气体含量及分布进行检测, 然后通过大气 TH 微量分子变化来监测全球气候变暖问题。2004 年美国国防部 DARPA 投入大量的资金, 研制 THz 成像阵列技术, 并最终研制出便携式、远距离 THz 成像雷达, 它可以在沙尘暴、浓烟及海上浓雾中寻找目标并清晰成像。由此可以看出, 在空间及环境探测应用中, TH 表现出以下优点: 1) 全天候能力; 2) 反目标隐蔽能力强; 3) 抗背景杂波干扰能力强; 4) 特别的穿透探测和识别能力; 5) 可实现三维成像。

4.3 生物医学

生物体对 TH 波具有独特的响应, 而且很多生物大分子如 DNA 分子的旋转及振动能级多处于 TH 波段, 所以 TH 在蛋白质等生物大分子无标志识别应用中有着举足轻重的作用。由于 THz 具有类似 X 射线的穿透能力, 且其光子能量小, 不会引起生物组织的光离化, 所以在生物医学成像方面非常安全, 适合于生物医学成像。Cher 等人利用 THz 技术测量了乳腺正常组织和肿瘤病变组织部分的不同光谱, 发现癌变组织和正常组织的 TH 波具有不同的振幅、波形和时延。因此, 我们可以通过 THz 对病变细胞的识别, 实现皮肤癌、乳腺癌的早期诊断和预防。太赫兹辐射不仅在皮肤癌检测上得到应用, 而且还在生物芯片和生物传感器方面发展迅速。另外, 由于大量有机分子转动和振动跃迁、半导体的子带和微带能量在 TH 范围, 所以 TH 有助于“指纹”识别、结构表征及分子生物信息应用的发展, 如通过 TH 来分析药物的物理、化学及生物成分、波谱特性、分子、量子相互作用过程等重要信息来对药物生产质量进行控制。

4.4 天文观测

TH在天文学上占有极为重要的地位,是射电天文学上极重要的波段,它可以结合卫星实现空间成像。我们还可以根据星际、星系际大气分子特征谱及行星和小星体的大气动力学原理,通过 TH来完成许多天文方面的应用。例如,2002年 2月欧洲遥感卫星(ERS)上用 ATSR观测海面的温度,图 7为其观测的海面温度图;南极天文望远镜通过使用 OPIL激光器作为 TH接收器的本地振荡器以测量 N_2^+ , H_2D^+ 和 CQ 又如 NASA的 Aura卫星通过载上一个 2.4 TH的激光器来测量同温层内 OH 的浓度和分布。

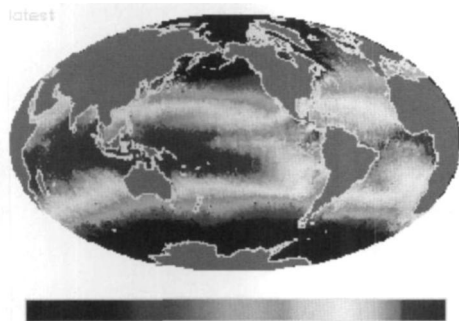


图 7 海面温度图
Fig 7 Sea temperature chart

此外,为更好地实现天文观测,国际上也部署了一些大型 TH天文计划,如 SMA和 ALMA计划等,SMA计划中的干涉阵是国际上目前唯一在运行的亚毫米波。美国在南极也部署了最好的地面亚毫米波站,利用 TH望远镜观察到很多重要的新星体,这对于研究宇宙的起源和星体的形成起到了不可估量的作用。

4.5 军事及通信

除了生物医学、天文观测和安全领域,太赫兹在军事、无线通信以及制造业方面也具有巨大的市场潜力。太赫兹技术在军事应用和无线通信技术,特别是高带宽、安全的校园通讯系统方面也有其广阔的应用前景。

TH具有非常宽的频谱,可工作在目前隐身技术所能对抗的波段之外,因此它能探测隐身目标,以其作为辐射源的超宽带雷达能够获得隐身飞机的图像。如军事作战中,探测敌对分子的武器藏匿处以及显示前方灰尘或烟雾中的坦克。如果我们能够在远距离雷达成像应用中很好地解决 TH宽带反隐身雷达技术、TH远距离传播相应的散射问题、TH传播过程中的相位相干性问题、图像分辨率问题等,TH在军事方面的应用将呈现出百花齐放的局面。

由于 TH通信具有大气不透明、带宽宽、天线小、定向性好、安全性高和散射小等特点,决定了其应用

领域非常广泛,包括卫星间星际通信、同温层内空对空通信、短程地面无线局域网、短程安全大气通信以及发展 TH通信理论。关于 TH军事通信的研究计划也层出不穷,如:美国航空航天局(NASA)、美国空军科学研究办公室实验室(AFOSR)和美国空军研究实验室(AFRL)的传感器研究部研究空军成像、通信和预警用的紧凑创新的 SG⁺基 TH源和探测器,欧盟第五框架计划资助的 WANTED工程(wireless area networking of terahertz emitters and detectors)及欧盟第五框架计划资助的 NanoTer工程(ballistic nanodevices for terahertz data processing)。

5 结 论

太赫兹的量子能量很低,信噪比很高,频率极宽,它覆盖了各种包括蛋白质在内的大分子的转动和振荡频率,并适用于实验研究固体材料晶格振动能谱。因此,在学术上有很重要的学术价值,在科学技术及工业上有很多诱人的应用。如前所述,太赫兹技术在空间运动目标的侦察、识别、致盲、对抗方面有极大优势,是无线通信和反恐辑毒的有利工具,是生物医学和探测成像的独特手段,这是未来技术的制高点,也是有巨大潜力需求的。从网络结构演进和业务需求看,都需要开发 10 Gbit/s速率,100 GHz频段,所以太赫兹并不遥远。

作者简介:



姚建铨(1939-) 中国科学院院士。1965年天津大学精密仪器研究生毕业。现任天津大学精密仪器与光电子工程学院教授、博士生导师、名誉院长、激光与光电子研究所所长。1997年当选为中国科学院院士。1980—1982年在美国斯坦福大学及加州大学等地作访问学者。曾应

邀在美国普林斯顿大学、宾夕法尼亚大学、南加州大学及法、英、德等国讲学及合作研究。多年从事激光与非线性光学频率变换技术的研究,在理论上有不少突破及建树。他提出并发展了双轴晶体三波互作用的最佳相位匹配精确计算的理论及方法,得到国际学术界确认,论文被多国学者引用百余次,被称为“姚技术”、“姚方法”;专著“非线性光学频率变换及激光调谐技术”是他多年来研究成果的总结及升华。近年来在高功率全固态激光器和采用 PPLN PPLT的倍频及光学参量振荡器等方面的研究达到国际先进水平。他在激光非线性光学频率变换领域取得系统的、创造性的成就,在国际上享有一定的声誉。

近年来姚院士特别关注太赫兹科学技术,主要研究以激光变频的方法产生太赫兹辐射源。2005年 11月与其他 6位院士共同发起第 270次香山会议“太赫兹科学技术的新发展”,推动了太赫兹研究在我国的开展和深化。