

TH 研究专题

太赫兹科学与技术

牧凯军^{1,2}, 张振伟², 张存林²

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2 首都师范大学 太赫兹光电子学省部共建教育部重点实验室, 北京 100048)

摘 要: 太赫兹电磁波段的开发和利用具有重大的科学意义和潜在的应用价值, 太赫兹科学技术已经成为本世纪最为重要的科技问题之一; 除了本身具有很多重大的科学问题之外, 它还是一种非常有效的研究手段。介绍了太赫兹科学技术的发展历史及国内外相关的发展情况, 列举了太赫兹波的独特性质, 概述了太赫兹科学技术在基础研究领域和应用研究领域的新进展。

关键词: 太赫兹; 太赫兹科学; 太赫兹技术; 太赫兹应用

中图分类号: O441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-5692(2009)03-221-10

Terahertz Science and Technology

MU Kaijun², ZHANG Zhenwei², ZHANG Cunlin²

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract Electromagnetic radiation within terahertz (THz) region has been seen as promising both in scientific research and practical applications. Now, THz science has been regarded as one of the most important science and technology issues in this century. Besides owning rich uncultivated scientific research areas itself, THz technology also provides an efficient and powerful probe for other research domains. This paper introduces the history of the THz technology, as well as related development of this field at home and abroad, briefly lists the unique characteristics of THz radiation and describes its new progress in the field of basic research and applied research in detail.

Key words: THz; THz science; THz technology; THz application

0 引 言

太赫兹 (Terahertz, 1 THz=10¹² Hz) 泛指频率在 0.1~10 THz 波段内的电磁波, 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, 如图 1 所示。早期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。在 20 世纪 80 年代中期之前, 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, 形成了所谓的“THz Gap”。

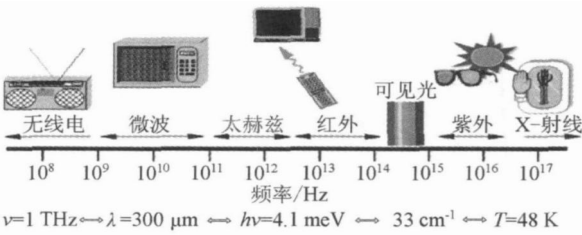


图 1 电磁波谱

根据图 1 中所示的太赫兹光子的等效温度, 可知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。通过深入研究太赫兹科

学技术,可以帮助人们探索未知世界和未知规律。

1 太赫兹历史及国内外发展状况

实际上,早在一百多年前,就有科学工作者涉及过该波段的研究,即在1896年和1897年,Rubens和Nichol对该波段进行先期的探索^[1]。在之后的近百年间,太赫兹科学与技术得到了初步的发展,许多重要理论和初期的太赫兹器件相继问世^[2-3]。而“Terahertz”这个词语正式在文章中出现却是在1974年左右,Fleming用它来描述迈克尔逊干涉仪所覆盖的一段频段的谱线^[4]。现代太赫兹科学与技术的真正发展则是在20世纪80年代中期,随着一系列新技术、新材料的发展,特别是超快技术的发展,使得获得宽带稳定的脉冲太赫兹源成为一种常规技术,太赫兹技术也从此得以迅速发展。

根据太赫兹辐射的重大应用前景,从20世纪90年代中期开始美国国家基金会、航天局、国防部和国家卫生学会等政府或军事部门,对太赫兹科学研究项目持续提供了较大规模的资金支持。欧洲国家除了各国自己所支持的研究项目以外,还利用欧盟的资金共同组织了跨国界、多学科、大型的合作研究项目,如Teravision THz Bridge STARTGER等。2004年,美国MIT将太赫兹科技评为“改变未来世界的十大技术”之五^[5-6]。日本政府近年来对太赫兹科研的投入经费每年都超过一千万美元,并于2005年1月8日将太赫兹科技列为“国家支柱技术十大重点战略目标”之首^[7]。目前,世界上约有130多家研究机构开展了相关的光电子材料、太赫兹激光器、太赫兹光谱学及相关生物医学成像等研究。

我国开展太赫兹研究相对来说起步较晚,但是政府予以高度的重视。特别是2005年11月22日,根据太赫兹科学技术所蕴含的重要学术与应用的研究价值,在国民经济和国防建设领域的战略价值,结合当时世界各国对这一领域的研究力度和关注,以“太赫兹科学技术的新发展”^[8]为主题的第270次学术讨论会在北京香山饭店召开,来自科研院所、高等院校等相关领域的44名专家学者参加了此次学术讨论会,交流了国内外THz科学技术的研究现状和发展趋势,探讨了我国THz科学技术研究的重大科学问题和拟要解决的关键技术。11位院士在会上发言,对太赫兹科学技术的重要性和我国未来发展战略提出了宝贵意见。“香山会议”上,决定将“南京大学、首都师范大学作为太赫兹开放式研发

平台,利于各研究单位间的合作与交流”。虽然我国在太赫兹的研究领域比国外起步晚了将近十年,但是目前总体上与国外的差距还不是很很大。

2 太赫兹辐射的独特性质

太赫兹电磁辐射具有很多独特的性质,正是这些特性赋予了太赫兹辐射广泛的应用前景。

相对于高频电磁波,太赫兹辐射的一些基本特征^[9-11]如下。

①高透性:太赫兹对许多介电材料和非极性物质具有良好的穿透性,可对不透明物体进行透视成像,是X射线成像和超声波成像技术的有效互补,可用于安检或质检过程中的无损检测。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。

②低能性:太赫兹光子能量为 4.1 meV (毫电子伏特),只是X射线光子能量的 $10^7 \sim 10^8$ 分之一,该值低于各种化学键的键能。太赫兹辐射不会导致光致电离而破坏被检物质,非常适用于针对人体或其他生物样品的活体检查。另外,水对太赫兹辐射有极强的吸收,所以该辐射不会穿透人体的皮肤,对人体是很安全的。由此,太赫兹辐射是皮肤癌、龋齿洞等医学检测的理想工具。

③指纹谱性:太赫兹波段包含了丰富的物理和化学信息。大多极性分子和生物大分子的振-转能级跃迁都处在太赫兹波段,所以根据这些指纹谱,太赫兹光谱成像技术能够分辨物体的形貌,鉴别物体的组分,分析物体的物理化学性质,为缉毒、反恐、排爆等提供相关的理论依据和探测技术。

另外,与低频电磁波相比,太赫兹频率较高,可作为通讯载体,在单位时间内可以承载更多的信息。太赫兹辐射方向性很好,可用于战场中的短距离定向保密通讯。利用太赫兹成像还可获得更高的空间分辨率及更长的景深等。

3 太赫兹的基础研究领域

太赫兹相关的科学研究发展已二十多年了,在此期间太赫兹源、探测器和相关器件不断的被发明创造,但仍处于起步阶段,对其基础研究还有待深入。太赫兹的基础研究大致可分为太赫兹的产生、传输、探测及太赫兹辐射与物质的相互作用四个领域。

3 1 太赫兹的产生

除了传统的太赫兹非相干的热辐射源（高压汞弧灯和碳硅棒）外，还有基于光学方法的太赫兹源、基于电子学方法的太赫兹源，以及基于等离子体方法的太赫兹源。

3 1. 1 基于光学方法的太赫兹源

目前，基于光学方法的太赫兹源主要有基于半导体瞬态电流的太赫兹源、基于非线性效应的太赫兹源和太赫兹气体激光器。其中，瞬态电流太赫兹源包括光电导机制和半导体表面产生机制；而基于非线性效应的太赫兹源包括光整流机制、光混频机制和参量源。光学方法所产生的太赫兹辐射大多为宽带脉冲辐射，但也有例外，如光混频和气体激光器会产生窄带连续太赫兹波。

光电导机制通常使用光电导材料作为辐射天线产生瞬态电流。光导天线有：偶极天线^[12-13]、蝴蝶结天线、V形槽缝天线^[14]、大孔径光导天线^[15-16]、天线阵列^[17-18]等。当光子能量大于光电导材料能隙宽度的超短激光束照射到材料上时，即 $h\nu \geq E_g$ 材料内部会产生电子-空穴对。在外加偏压的作用下，这些光生载流子会沿电场方向加速运动形成一个瞬态电流，从而向外辐射 TH 脉冲，如图 2（a）所示。半导体表面产生机制则不需外加偏压场，而是利用半导体的表面场（表面耗尽场或肖特基电场）作用光生载流子形成瞬态电流，最终产生太赫兹辐射^[19-20]，如图 2（b）所示。

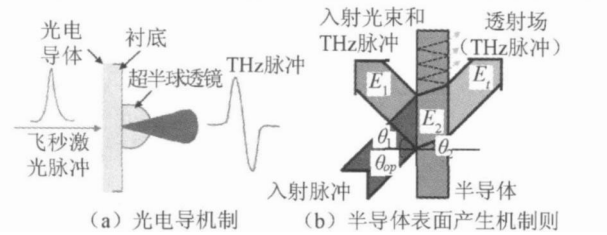


图 2 瞬态 TH 辐射的产生

光整流和光混频都是基于二阶非线性效应在非中心对称或各项异性材料当中产生太赫兹辐射的。其中，光整流利用的是 $\chi^{(2)}(0, -\omega, \omega)$ 使飞秒激光脉冲和非线性介质相互作用产生低频振荡的时变电场^[21]，如图 3 所示；而光混频则是利用 $\chi^{(2)}(\omega_1 - \omega_2, \omega - \omega_2)$ 使两独立的连续波在光电导体中发生外差混频^[22]。太赫兹参量源是利用二阶光学参量产生和放大效应 $\chi^{(2)}(\omega_1 - \omega_2, \omega - \omega_2)$ 及三阶非线性拉曼效应产生太赫兹脉冲的^[23-24]。

太赫兹气体激光器利用 CO₂ 激光器泵浦低压真空腔中的气体物质，将气体分子从基态的转动能

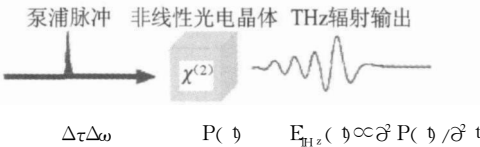


图 3 光整流机制原理图

级泵浦跃迁到激发态的转动能级，在一定条件下形成粒子数翻转，向外辐射高功率的连续太赫兹波^[25]。

3 1. 2 基于电子学方法的太赫兹源

基于电子学方法的太赫兹源通常可产生窄带连续太赫兹波，是比较容易实用化的太赫兹源。基于该方法的太赫兹源也可大致分为三类：太赫兹真空微电子器件、太赫兹相对论性器件和太赫兹半导体激光器。

太赫兹真空微电子器件大多是基于微波器件结合先进的微细加工技术（如 LIGA 技术、MEMS 技术）利用微波管的分布作用原理产生太赫兹波的微型真空电子器件^[26-28]，如行波管^[29-30]、速调管^[31-33]和返波管^[34]等。太赫兹相对论性器件主要有奥罗管^[35]、回旋管^[36-37]和自由电子激光器^[38-39]等，它们利用相对论，即电子的运动速度达到或接近光速，由电子的同步辐射产生高功率的太赫兹辐射。太赫兹半导体激光器常见的有耿氏二极管^[40]、P-GaAs 激光器^[41]和量子级联激光器等。量子级联激光器（QCL）^[42-45]，如图 4 所示，QCL 不同于传统的半导体激光器，QCL 根据重复周期的量子阱结构，利用子带间的级联跃迁实现辐射的。太赫兹 QCL 是目前唯一的一种能够在 1 THz 以下提供平均功率大于 10 mW 太赫兹辐射的固态相干太赫兹源。到目前为止，最新的 QCL 已经在 225 K 的温度下正常工作，输出频率可达 3 THz。太赫兹 QCL 已经覆盖了 1.5~4.5 THz 的频段。

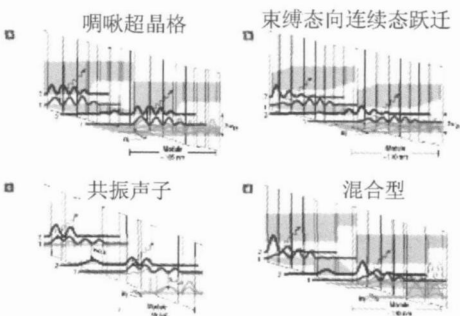


图 4 不同结构的太赫兹量子级联激光器

3 1. 3 基于等离子体方法的太赫兹源

基于该方法的太赫兹源同样也可分为三类：空气中光丝产生太赫兹、激光尾场产生太赫兹和表面等离子产生太赫兹。空气中光丝产生太赫兹的技术可使太赫兹完全摆脱距离的限制，科学家推测可在几公里

以外产生出太赫兹脉冲,同时也避免了太赫兹在空气中传输被水份吸收的问题,目前,相关的基本产生机制还没有定论,许多人建立了各自的模型来对这一现象进行解释。到目前为止,所提出的模型有:有质动力模型^[46]、四波混频模型^[47]、辐射压力模型^[48]和电子—离子散射模型^[49],以及最新提出的一种量子模型^[50]。激光尾场产生太赫兹则可分为磁化均匀等离子体中切伦科夫辐射^[51]、非均匀等离子体中线性模式转换^[52-53]、跃迁辐射^[54-55];另外,研究发现利用超短飞秒脉冲激励纳米量级的金属周期结构,可产生表面等离子体。同时,该结构可将飞秒激光和表面等离子体场聚焦,以发生很强的非线性效应。在此聚焦场有足够能量将金属薄膜上的电子“轰击”出来,根据电子的“出和入”可得到太赫兹脉冲^[56],如图5所示。

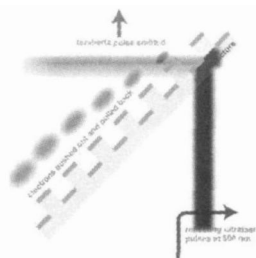


图5 表面等离子体产生太赫兹原理图

3.2 太赫兹辐射传输

由于大气中的水汽、氧气、二氧化碳等对太赫兹辐射吸收较强,使得太赫兹在自由空间中的传输十分困难。再者,太赫兹辐射不能被很好的控制、聚焦,太赫兹脉冲,以频率分量呈径向分布,造成聚焦度、孔径,甚至自由空间传输对太赫兹的波形及其光谱都具有很大的影响。太赫兹传输的重点和难点在于太赫兹辐射的导波传输问题及太赫兹波相关的导向传播和自由传播间的有效耦合问题^[57]。

目前常见的太赫兹波传输有两种方法——波导传输技术和准光学技术。波导方法需要金属波导腔或介质光纤。在波长低于毫米级频率范围内,金属波导方法有很大的能量损失,大约与频率的平方成正比,而利用光纤则有色散和较高的吸收^[58]。

太赫兹波在波导中传输可应用于近场太赫兹波器件、太赫兹波互联、太赫兹波准光学腔和实现太赫兹波谱的超灵敏测量等。在用波导传输太赫兹脉冲时,必须选取群速度色散较小的波导。另外,太赫兹波还可以和金属表面的等离子体振动耦合,例如,将金属线上刻出一系列精细凹槽,可以较为理想的引导太赫兹波,该结构可以将太赫兹聚焦成万分之一

毫米的小点(普通的透镜只能聚焦到几分之一毫米)。目前关于太赫兹波导传输技术的研究有:太赫兹在圆形和矩形金属波导中的传输,单模太赫兹波在蓝宝石光纤中的传输,聚乙烯介质带平板波导中的传输,太赫兹脉冲通过细小孔径、金属狭缝(薄与厚两种情况下)的传输,以及太赫兹光子晶体波导等^[14]。目前,太赫兹波导传输主要还是受到传输损耗率、色散性和弯曲损耗率等的影响^[9]。

准光学技术是太赫兹传输的常用方法,它可将自由空间中传输的太赫兹波由发射端传输到接收端,或是将自由传输的太赫兹波有效的耦合到波导之中。美国科学家研制出了一种由半导体(铟—镓—砷和铝—铟—砷)交叠分层组成的具有负折射率的人工电磁介质。基于该材料可以制成平面透镜,进行高分辨率的物质成像,将来有望拓展到太赫兹波段,目前仅是工作在红外波段。

3.3 太赫兹探测

太赫兹探测技术是太赫兹科学技术应用的延伸,太赫兹的探测方法归为两种:相干探测和非相干探测。但由于目前太赫兹辐射源的功率普遍偏低,因此发展高灵敏度、高信噪比的太赫兹探测技术十分重要。

3.3.1 太赫兹相干探测

常见的太赫兹脉冲的相干探测方法有光电导取样^[60-61]、电光取样^[62]、外差探测^[9],以及近年来发展的空气等离子体探测^[63]等。

光电导取样是光电导天线产生太赫兹的逆过程,二者的结构大体相同,只是前者没有外置偏压,而是连接电流计一类的装置。根据光电导天线中所产生的光电流与驱动它的太赫兹电场成正比现象,间接测量瞬时太赫兹电场。该方法适用于低频太赫兹的探测,有很好的信噪比和灵敏度,但探测带宽窄。电光取样则是光整流的逆过程,是基于Pockels效应来得到太赫兹脉冲的相关信息。该方法适用于高频太赫兹的探测,具有探测带宽宽、高信噪比、高灵敏度、响应时间短等优点。外差检测是太赫兹辐射最灵敏的探测方式之一,利用一本振提供与所测太赫兹信号频率相近且性能稳定的单频参考信号,而后太赫兹信号与参考信号在混频器中差频产生出一个中频信号,根据对该中频信号的后处理就可得到所测太赫兹信号的相关信息。常用的混频器有肖特基二极管^[64]、SIS(超导体—绝缘体—超导体)^[65]、HEB(热电子测辐射热计)^[66]等。

3.3.2 太赫兹非相干探测

太赫兹非相干探测器一般都是基于光热效应和光子效应的探测器,能够直接测量太赫兹信号。光热探测器一般有测辐射热计^[9 10]、热释电探测器^[9 10]和高莱探测器^[9 10 67],它们都是将吸收的太赫兹辐射的能量转换为探测元件的电学性质或物理性质,如温度、电阻率和自发极化强度等的变化。

太赫兹光子探测器基于所接收的太赫兹能量改变探测器内原子或分子的内部电子状态,由光生伏特效应对太赫兹信号的探测。常见的光子探测器有肖特基二极管、Si场效应管(FET)^[68 69]、单光子探测器^[70]和量子阱探测器(QWP)^[71 72]等。其中,QWP是最为理想的太赫兹高速测量工具,它的结构与QCL的“三明治”结构相类似:中间是窄带隙半导体,两侧是宽带隙半导体势垒层,基于自带间吸收的原理(也有小部分是基于带间吸收的)来探测太赫兹信号。现在太赫兹QWP已经研制成功,具有频率选择性的特点,而且响应速度快,背景噪声小,灵敏度高。但它在工作温度和探测率等方面还有待提高。

3.4 太赫兹波与物质相互作用

利用太赫兹波来研究物质的性质,必须得先了解太赫兹波与不同介质(如气体、液体和固体等)相互作用的特性,如介质对太赫兹的吸收、相移和散射等特性。通过振幅和位相变化的测量,可以表征介质材料的电子、晶格振动和化学成分等性质,由此可以精确测量材料的吸收系数、折射率、介电常数、频移等相关特性,以及物质内部的超快过程。

通过研究,太赫兹波与导体或高自由载流子浓度的半导体的相互作用可以分析这些材料的介电常数、载流子浓度,以及它们在太赫兹波段的折射率等。另外,利用太赫兹波与部分物质相互作用还可以研究物质的能级结构,确定物质的能级共振结构,研究分子的转动能级或振动能级,晶体的声子振荡及晶体的声子结构等。

近年来,太赫兹与具有周期性亚波长金属结构表面的相互作用引起了人们的极大兴趣。这种结构大多是在半导体衬底上镀上微米厚度的金属薄膜,如金属孔阵列、金属共振环等,主要研究这些人工结构的表面等离子体和太赫兹波耦合的问题。国内称这些材料为太赫兹特异性材料,这些材料与太赫兹电磁波发生相互作用可以得到许多奇特的物理现象^[73~75]。例如,高达数百倍的透射增强现象,负折射率的实现,无衍射聚焦和高效导波现象等。利用这些材料可以

有效的对太赫兹波进行频率、位相调制和滤波等。

4 太赫兹的应用研究领域

太赫兹科学技术现在已经涉及到了通讯、军事、反恐、医学、安检和天文观测等领域,如图6所示。

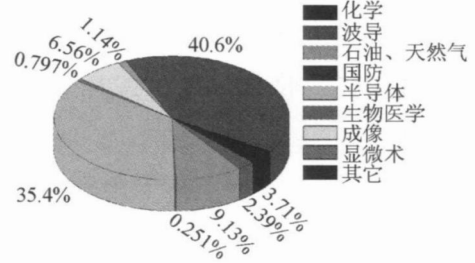


图6 当前太赫兹科学技术所涉及的领域及所发表的研究论文的比例

太赫兹光谱和成像是太赫兹应用研究的两大基础领域。太赫兹光谱中包含了丰富的物理和化学信息,许多物质在太赫兹波段都有指纹谱。利用太赫兹光谱技术不但可以对样品进行静态的高时间分辨率非接触式的相干测量,也可以探测样品的动态信息,对样品的细微变化进行快速精确的分析和判断。另一方面,由于太赫兹的高透性,太赫兹可对许多非极性物质进行透射成像。但是太赫兹也不是万能的,它不能穿透金属,所以不能对金属容器内部进行检测;另外,水对太赫兹辐射吸收很强烈,由此使得太赫兹不能探测水中物体,因而不能对人体进行透射成像。

4.1 太赫兹在基础学科中的应用

太赫兹科学技术是电磁学、光学、半导体物理学、激光物理学、量子力学、固体物理等学科的交叉,它为这些学科的研究提供了新的方法和手段。太赫兹不仅仅能在量子相干和控制发挥巨大的作用,它在局域化问题、非线性光学、天体物理和大气科学等研究中也有很好的应用。太赫兹还是研究极端条件下物质如火焰、等离子体等的理想工具。

太赫兹科学在化学中研究分子团簇等气相物质的光谱和动力学性质,可为人们提供非共价相互作用的相关信息;研究液体的线性和非线性光谱的细节,能更好的处理诸如溶剂的问题。由于大量有机或无机晶体的声子模式都处在太赫兹频段,利用太赫兹技术可以探测和测量这些晶体的平衡态和动力学过程。另外,利用太赫兹还可以研究材料的表面声子模式和吸附物与表面的相互作用。

太赫兹科学在生物学的研究当中更是如鱼得水,因为许多生物大分子、基团的共振吸收能级都在

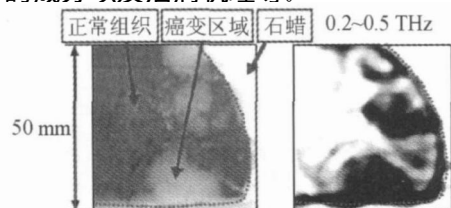
太赫兹波段。太赫兹光谱技术,对蛋白质的二级和三级结构细节的研究会有很大的帮助;太赫兹技术在DNA、RNA或其相关分子的研究也具有很大的潜力,已经实现了对单个DNA和双排DNA序列的探测,测得了单个DNA的太赫兹光谱,这使得太赫兹科学技术在DNA动力学研究、无标记基因检查、细胞水平成像等领域具有非凡的表现。

4.2 太赫兹在生物医学中的应用

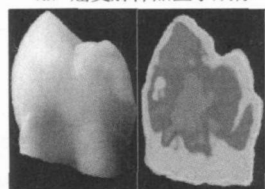
太赫兹光谱与成像技术在生命科学和医学诊断领域有可能超越现有的成像技术,是研究树木年代学、植物中水运输过程、选种和病理学等方向的有利工具。

利用太赫兹成像技术可以对树密度进行精确测量,这样不仅可为木材和造纸等相关厂家提供关键的材料参量,而且还能由此推测气候的变化情况。利用太赫兹亲水性,可揭开植物中水的运输机理之谜;同时基于太赫兹光谱技术也可以研究干旱环境下植物中再水化的问题。

目前,很多人对太赫兹医学成像抱有希望,而且现在已有人完成了对人的龋齿、烧伤皮肤和癌变组织等的太赫兹成像实验,现象效果十分明显,如图7所示。将来,太赫兹成像技术可以方便地对药片和胶囊进行结构成像及化学成分鉴定等。另外,药片外部所覆盖的药膜厚度,也可利用太赫兹成像进行精确的测量,因为药膜的厚度与其平均溶解时间有关系,而药膜则可保证药剂的准确释放时间,以达到对症下药。太赫兹成像技术是目前唯一能够进行药膜的湿溶测试的技术,这是常规技术所不能比拟的。利用太赫兹技术可对中草药进行鉴别研究,研究它们中的成分以及治病机理等。



(a) 癌变肝样品医学成像



(b) 牙齿的太赫兹医学成像

图7 太赫兹医学成像

4.3 太赫兹通讯

现有的短程通讯系统如蓝牙和无线局域网的带宽在10年后将不能满足人们的需求,它们的载波频率也只有几个GHz,超宽带技术也面临着同样的问题,这些系统的数据传输率被限制在1 GB/s。虽然现在固定的点对点通讯系统可以工作到60 GHz,但是上述这些系统只能满足人们10~15年的带宽需求。而在未来的15年之后,通讯系统的数据传输率会超过10 GB/s,而系统的工作频率则是在几十甚至上百GHz,由此短距离通讯系统相应的载波频率则必须随之增大,即达到太赫兹频段。

太赫兹电磁波是很好的宽带信息载体,特别适合作卫星间、星地间及局域网的宽带移动通讯。太赫兹通信可以获得10 GB/s以上的无线传输速度,这比当前的超宽带技术快几百甚至上千倍。将来利用太赫兹无线网络下载一部DVD电影几乎是“弹指一挥间”,几秒钟即可完成。另外,太赫兹与可见光和红外线相比它同时具有极高的方向性及较强的云雾穿透能力,使得太赫兹通信可以以极高的带宽在战场中进行定向、高保密甚至明码军事通信。

太赫兹通讯前景诱人,有人预测在2020年能够实现太赫兹室内无线通讯。而早在前几年,德国的Braunschweig科技大学基于太赫兹时域光谱系统,利用他们研制的能在常温下工作的半导体太赫兹调制器,成功地进行了0.3 THz频率点的无线通讯,通讯距离超过了22 m。而国内方面,上海微系统研究所基于QCL和QWIP在2008年底也成功进行了4.1 THz频率点的无线通讯演示实验。尽管太赫兹通信取得一些进展,但是它还是处于发展的萌芽阶段,离商用太赫兹无线网络系统还很遥远。开发短距离太赫兹通讯系统会遇到很多的挑战,这是一项长期的研究任务。

4.4 太赫兹在反恐和安检中的应用

自“9.11”事件发生以后,恐怖主义事件频发,如何能够有效的预防和阻止恐怖袭击成为世界各主要国家的难题。现有的技术能在一定程度上对恐怖袭击提供预警,而太赫兹波却是天生的反恐和安检“专家”,许多爆炸物及其相关成分和毒品在太赫兹波段都有指纹谱,如图8所示,再加上太赫兹的非电离性、强穿透性,可使其能够在机场、车站、码头等人口密集区提供远距离、大范围的预警。太赫兹光谱和成像技术它能够有效的对藏匿在个人衣物下或行李物品中金属物品、隐蔽武器和炸药进行光谱测量或

成像,如图9所示。太赫兹安检设备能够有效的排查出爆炸物、生化违禁物、武器和毒品等危险物品,甚至能确定它们的化学成分,避免恐怖袭击的发生。

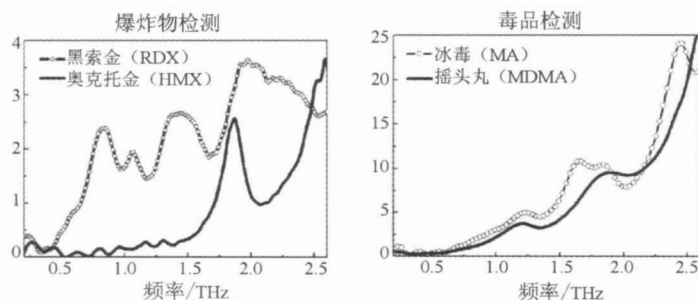


图8 部分爆炸物和毒品的太赫兹指纹谱

太赫兹安检有望近年成为现实,2008年12月4日,美国《Popular Mechanics》杂志所预测的2009年将可能实现的十大科技概念之中,用于安全检查的太赫兹科技被列到了首位。目前,国外的一些公司已开发出太赫兹安检设备的工程样机,有些在机场中进行了试用。它们可以主动或被动的对视场中的人或物直接进行检测,而且对人体不会造成任何伤害。另外,TH成像和光谱技术还能检测发送的货物如邮件、纸质包裹、塑料和木箱等,看它们当中是否有危险或违禁物品。

4.5 太赫兹雷达在军事上的应用

以信息技术为核心的现代化战争中,信息化的武器装备比例不断提高,作为一个新的频段资源,太赫兹波技术在军事上有很强的军事应用前景,对国防和国家安全具有重要的应用价值。与微波雷达相比,太赫兹雷达可以探测到更小的目标,实现更精确的定位,具有更高的分辨率和更强的保密性。而与红外雷达和激光雷达相比,太赫兹雷达具有穿透沙尘、烟雾的能力,可以实现全天候工作。基于太赫兹的特有的“穿墙术”,太赫兹雷达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。

另外,太赫兹雷达还可远程探测空气中传播的有毒生物颗粒或化学气体,引导航空航天器全天候起飞或着陆。利用强太赫兹辐射穿透地面,能探测所埋地下的雷场分布,或者可以进行远程炸弹探测等。太赫兹雷达还是反隐身的利器,不管是基于形状隐身还是涂料隐身,甚至基于等离子体隐身的飞行器,对于太赫兹雷达而言,探测到它们简直是易如反掌,能让他们瞬时“现出原形”。因为太赫兹雷达工作在隐形所用的工作波段之外,太赫兹波比毫米波短,可以轻易接收到飞行器的回波,而现有的吸波

而在塑料凶器、陶瓷手枪、塑胶炸弹、流体炸药和人体炸弹的检测和识别上,太赫兹技术更是“独上高楼”,而这是大部分现有的常规检测方法所做不到的。

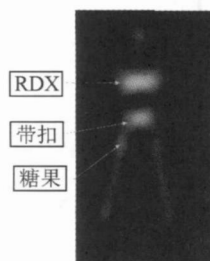


图9 人体炸弹的太赫兹成像

材料也只是对特定的波段才起作用;至于等离子体,太赫兹波可以在其中传播,所以等离子体隐身技术在太赫兹雷达面前也是无能为力。另外根据太赫兹能够穿透等离子体的特性,可以将其应用到航天飞机或宇宙飞船发射或回收过程当中。这是因为在发射和回收的过程当中,有一段时间由于空气电离会造成发射基地与飞船或航天飞机的通讯中断。而如果利用太赫兹技术,就可以弥补这一点,能保持联络通畅,这是别的技术所无法做到的。

4.6 太赫兹在航空航天领域中的应用

在航天器和航空器的时代,定期对它们进行损伤、疲劳和化学剥蚀检查是十分关键和必要的。太赫兹成像技术现已是美国航天局用来检测航天器缺陷的四大技术之一(其他三种为:X光成像、超声波成像和激光剪切力成像)。特别是在哥伦比亚号惨剧发生之后,太赫兹技术有效地检测出了导致惨剧的原因所在(外部燃料箱泡沫脱粘所致),如图10所示,使得太赫兹技术从此声名远播。现在太赫兹成像技术除了能够应用于航天飞机外燃料箱绝缘泡沫中气孔和脱粘现象的检测之外,它还可应用于热防护系统(矩形二氧化硅耐火板)、助推火箭的涂层、附有陶瓷涂层的涡轮叶片,复合结构,层压板,碳-碳复合材料的表面等部件的无损检测。检测它们内部是否含有诸如气孔、脱粘,夹杂物、非正常几何构形等的缺陷,以避免哥伦比亚悲剧的重演。目前我国也进行了这方面的研究,首都师范大学的连续太赫兹波系统对火箭燃料箱泡沫的人工缺陷进行检测,得到了很好的检测结果,如图10所示。

另外,NASA和航空航天工业将太赫兹推广至商业化的层面,如利用TH反射成像检查航天飞机外部燃料箱绝缘泡沫的气孔和脱粘现象。将太赫兹

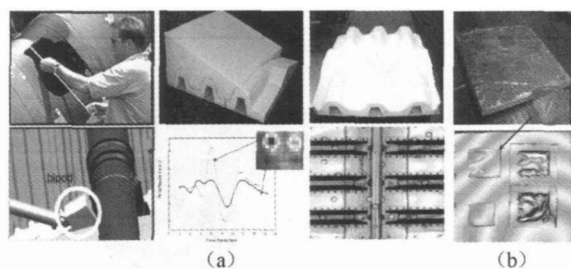


图 10 燃料箱泡沫的太赫兹检测

无损检测成像应用到复合树脂、陶瓷、塑料、自然材料和其他非金属材料的检测上面。利用 THz 三维成像可以检测汽车仪表盘、建筑物内的墙后和地板材料表面检测,印刷电路版的脱层问题、密封性检测,瓷砖、纸张等的生产检测。

4.7 太赫兹在天文方面的应用

在 20 世纪 80 年代之前,太赫兹科学技术也仅仅是在天文学(研究宇宙背景辐射)和激光核聚变(诊断等离子体)等少数领域中应用。太赫兹空间探测现基本应用于对地观测、射电天文、行星/彗星科学探测及地外生命信息等。

宇宙能量被称为太赫兹能量,也许很多人以前根本都没有听说过这个说法,但事实上宇宙中至少有 98% 的辐射能量就处在太赫兹或远红外电磁波谱中。高层大气中也有很强的天然太赫兹源,如羟基、氯化氢和水,根据它们所得到的信息可以了解支配臭氧循环、全球变暖的化学过程。

利用太赫兹可以研究许多星体,如金星、火星、木星等行星,木卫二、土卫六等卫星,以及彗星和小行星;探索星际间气态区域可能会存在新的星体形式,以及其他星系气体、尘埃等;搜寻地外生命信息;推测太阳系、银河系或其他星体的形成原因和演化过程。另外,太赫兹也是探测月球和火星上是否存在水的有力工具之一。最后,通过太赫兹还可以了解更多有关地球大气层的重要信息,通过获取臭氧损耗机制的研究数据,可以研究对流层和平流层的状况,进而为全球变暖提供有价值的信息。现在,欧美等发达国家有的已经实施或计划实施许多太赫兹空间计划。如美国的 EOS-AURA 上的 MLS 系统已投入使用 5 年,欧洲的 MIRC 同样运行了 5 年,日本的 AKAR 运行了两年,而 SOFIA GREAT ALMA Hersche 等计划正在实施或筹备过程当中。到目前为止,根据这些空间太赫兹设备欧美等在一定程度上实现了对地球大气的成分,对流层的化学性质及其动力学、温度压力、动力学,火山活动和云层中冰颗粒的分布等情况的科学研究工作。

5 结 语

太赫兹科学技术是本世纪的又一场“前沿革命”,它已成为科学研究的热门课题之一。太赫兹科学技术方兴未艾,已在一些重要的研究领域显示出其独特优越性。在 21 世纪,太赫兹的应用研究将是相关科研人员的研究重点。太赫兹科学技术并不是万能的,它只是在一些领域是令其他技术诸如红外技术和微波技术等所不能比拟,但在另外一些方面它只是作为其他技术的补充和延伸。虽然太赫兹科技在辐射源、探测器及相关的功能元器件技术方面发展不够理想,尚不能实用化、商业化,但它仍具有很高的科学研究价值和巨大的发展潜力。

参考文献:

- [1] RUBENS H, SNOW B W. On the Refraction of Rays of Great Wavelength in Rock Salt, Sylvine and Fluorite [J]. Philosophical Magazine, 1983, 35: 35-45.
- [2] KMMIT M F. Restriction to T-Rays, 100 Years of Terahertz Radiation [J]. Journal of Biological Physics, 2003, 29: 77-85.
- [3] JAMES C W. ILTSE. History of Millimeter and Submillimeter Waves [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(9): 1118-1127.
- [4] PETER H. Siegel. Terahertz Technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [5] 10 Emerging Technologies That Will Change Your World [EB/OL]. http://www.technologyreview.com
- [6] 王宏飞. 改变未来世界的十大技术之一——太赫兹技术 [J]. 科技大视野, 2005, 4: 60-64.
- [7] 何德功. 日本确立国家十大支柱技术 举全国之力研发 2015 年前完成. http://www.stdaily.com/gb/stdaily/2005-01/10/content_344822.htm
- [8] 刘盛纲, 姚建铨, 张杰, 等. 太赫兹科学技术的新发展 [C]. 香山科学会议第 270 次学术讨论会, 2005.
- [9] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [10] 张存林, 等. 太赫兹感测与成像 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [11] 王少宏, 许景周, 汪力, 等. THz 技术的应用及展望 [J]. 物理, 2001, 30(10): 612-615.
- [12] AUSTON D H, CHEUNG K P, SMITH P R. Picosecond Photoconducting Herzan Diodes [J]. Appl Phys Lett, 1984, 45(3): 284-286.
- [13] PETER R. SMITH, DAVID H. et al. Subpicosecond Photo-

- conducting Dipole Antennas[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(2): 255-260
- [14] DRAGOMAN D, DRAGOMAN M. Terahertz Fields and Applications[J]. Progress in Quantum Electronics, 2004, 28: 1-66
- [15] DARROW J T, HU B B, ZHANG X-C, et al. Subpicosecond Electromagnetic Pulses from Large-aperture Photoconducting Antennas[J]. Optics Letters, 1990, 15(6): 323-325
- [16] DARROW J T, ZHANG X-C, AUSTON D H. Power Scaling of Large-aperture Photoconducting Antennas[J]. Appl Phys Lett, 1991, 58(1): 25-27
- [17] FROBERG N, MACK M, HU B B, et al. 500 GHz Electrically Steerable Photoconducting Antenna Array[J]. Appl Phys Lett, 1991, 58(5): 446-448
- [18] FROBERG N M, HU B B, ZHANG X-C. Time-division Multiplexing by a Photoconducting Antenna Array[J]. Appl Phys Lett, 1991, 59(25): 3207-3209
- [19] KINOMISAKAI. Terahertz Optoelectronics Mj. Berlin: Springer, 2005
- [20] ZHANG X-C, HU B B, DARROW J T, et al. Generation of Femtosecond Electromagnetic Pulses from Semiconductor Surfaces[J]. Appl Phys Lett, 1990, 56(11): 1011-1013
- [21] WANG ZHIPENG. Generation of Terahertz Radiation via Nonlinear Optical Method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(1): 1-5
- [22] MATSUURA SHUJI, HIROSHI IIQ. Generation of CW Terahertz Radiation with Photon Mixing Terahertz Optoelectronics Mj. Topics Appl Phys, 2005
- [23] KODO KAWASE JUN-ICHI, SHIKATA HIROMASA IIQ. Terahertz Wave Parametric Source[J]. J Phys D: Appl Phys, 2002, 35: R1-R14
- [24] HSYASHI S, MAKIKI OTANI C, et al. Terahertz Wave Parametric Sources[C] //Proc of SPIE, 2006, 5975: 5975N-1-N-10
- [25] ERIC R Mueller. Optically Pumped THz Laser Technology[EB/OL]. <http://coherent.com/Downloads/OpticalPumpedLaserRev2.Pdf>
- [26] FETM FRANK E SLOAN. Microwave Principles Mj // Navy Electronic and Electronics Training Series USA. Naval Education and Training Professional Development and Technology Center, 1998
- [27] VISHNU SRIVASTAVA. THz Vacuum Microelectronic Devices. Vacuum Science and Technology[J]. Journal of Physics, 2008, 114: 1-10
- [28] SHIN YOUNG-MIN, LARRY R BARNETT, NEVILLE C, et al. MEMS-Fabricated Micro Vacuum Electron Devices (μ VEDs) for Terahertz (THz) Applications[C]. Infrared Millimeter and Terahertz Waves, RMMW-THz 2008, 33rd International Conference, 2008, 1-3
- [29] PIERCE J R. Traveling-wave Tubes[J]. D. Van Nostrand Company, NC, 1950
- [30] BHATTACHARJEE S, BOOSKE J H, KORY C L, et al. Investigations of Folded Waveguide TWT Oscillators for THz Radiation[C]. Vacuum Electronics, 2003, 4th IEEE International Conference, 2003, 317-318
- [31] BONIFACIO R, CORSNIR, PIERNIP. Theory of High-Gain Optical Klystron[J]. Physical Review A, 1992, 45(6): 4901-4906
- [32] PETER H, SIEGEL, ANDY FUNG, Harish Manohara. Nanoklystron: A Monolithic Tube Approach to THz Power Generation[C]. 12th Int Conf on Space THz Tech, Proc San Diego, CA, 2001
- [33] ALBERT ROIMAN, DAVE BERRY, MARK HYTTINEN, et al. Sub-Millimeter Waves from a Compact Low-Voltage Extended Interaction Klystron[C]. Infrared and Millimeter Waves, 2007, and the 2007, 15th International Conference on Terahertz Electronics, RMMW-THz, Joint 32nd International Conference, 2007, 892-894
- [34] GRÜNER G. Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids Mj. Berlin: Springer, 1998
- [35] BRATMAN V L, DUMESH B S, FEDOTOV A E, et al. Broadband Oron Operation at Millimeter and Submillimeter Wave[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 23(11): 1595-1601
- [36] JEFFREY ROBERT VIEREGG. A CW 250 GHz Gyrotron Oscillator for Use in Dynamic Nuclear Polarization[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2000, 1-60
- [37] VLADIMIR BRATMAN, MIKHAIL GLYAVIN, TOSHITAKA IDEHARA, et al. Review of Subterahertz and Terahertz Gyro-devices at AP RAS and FR RU[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2009, 37(1): 36-43
- [38] FRANK TRÜGER. Handbook of Lasers and Optics Mj. Berlin: Springer, 2007
- [39] SRINIVASKRISHNAGOPAL, VNITKUMAR. Free electron Lasers: Radiation Physics and Chemistry[J]. 2004, 70: 599-569
- [40] Gunn Oscillators[EB/OL]. http://www.standrews.ac.uk/www_pay/Scots_Guide/RadCom/Part5/page2.htm
- [41] ODOBLYUDOV M A, YASSEVICH IN, KAGAN M S, et al. Mechanism of Population Inversion in Uniaxially Strained P-Ge Continuous-Wave Lasers[J]. Physical Review B, 2000, 62(23): 15291-15294
- [42] BENJAMIN S WILLIAMS. Terahertz Quantum Cascade Lasers[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2003, 1-310
- [43] ROBERTO PAIELLA. Intersubband Transitions in Quantum

- tum Structures M]. McGraw-Hill Companies 2006
- [44] MARK LEE MICHAEL C WANKE Searching for a Solid-State Terahertz Technology J. Science 2007 316(5821): 64-65
- [45] WADE A FEDOROV G, SMIRNOV D et al Magnetic-field controlled THz Quantum Cascade Laser Operating Up to 225 K J. Nature Photonics 2009 3: 41-45
- [46] SPRANGLE P PEÑANO J R HAFIZI B et al Ultrashort Laser Pulses and Electromagnetic Pulse Generation in Air and on Dielectric Surfaces J. Physical Review E 2004 69(6): 066415-1-18
- [47] COOK D J HOCHSTRASSER R M Intense Terahertz Pulses by Four-Wave Rectification in Air J. Optics Letters 2000 25(16): 1210-1212
- [48] CHENG CHUNG-CHIEH WRIGHT E M MOLONEY J V Generation of Electromagnetic Pulse from Plasma Channels Induced by Femtosecond Light Strings J. Physical Review Letters 2001 87(21): 213001-1-4
- [49] HOYER W KNORR A MOLONEY J V et al Photoluminescence and Terahertz Emission from Femtosecond Laser Induced Plasma Channels J. Physical Review Letters 2005 94(11): 115004-1-4
- [50] NICHOLAS KARPOWICZ ZHANG X-C Coherent Terahertz Echo of Tunnel Ionization in Gases J. Physical Review Letters 2009 102(9): 093001-1-4
- [51] YOSHII J LAI C H KATSULEAS T Radiation from Cerenkov Wakes in a Magnetized Plasma J. Physical Review Letters 1997 79(21): 4194-4197
- [52] SHENG ZHENG-MING KUNDKIMMA ZHANG JIE et al Emission of Electromagnetic Pulses from Laser Wakefields through Linear Mode Conversion J. Physical Review Letter 2005 94(9): 095003-1-4
- [53] WU HUI-CHUN SHENG ZHENG-MING DONG QUAN-LI et al Powerful Terahertz Emission from Laser Wakefields in Inhomogeneous Magnetized Plasmas J. Physical Review W 2007 75(1): 016407-1-7
- [54] LEEMANS W P GEDDES C G R FAURE J et al Observation of Terahertz Emission from a Laser Plasma Accelerated Electron Bunch Crossing a Plasma-Vacuum Boundary J. Physical Review Letters 2003 91(7): 074802-1-4
- [55] SCHROEDER C B ESAREY E VAN T BORG J et al Theory of Coherent Transition Radiation Generated at a Plasma-vacuum Interface J. Physical Review E 2004 69(1): 016501-1-12
- [56] GREGOR H WELSH NEIL T et al Terahertz Pulse Emission Through Laser Excitation of Surface Plasmons in a Metal Grating J. Physical Review Letters 2007 98(2): 026803-1-4
- [57] GALLOT G JAMISON S P MCCOWAN R W et al Terahertz waveguides J. J Opt Soc Am B 2000 17(5): 851-863
- [58] 李玉林, 陈华, 汪力, 等. 太赫兹波的产生、传播和探测 J. 现代物理知识, 2006 18(3): 29-30
- [59] KANGLIN WANG DANIEL M MITLEMAN Metal Wires for Terahertz Wave Guiding J. Nature 2004 432: 376-379
- [60] CAI Y BRENER J LOPATA J et al Coherent Terahertz Radiation Detection: Direct Comparison between Free-Space Electro-Optic Sampling and Antenna Detection J. Applied Physics Letters 1998 73(4): 444-446
- [61] PARK SANG-GYU MICHAEL R MEILLOCH et al Analysis of Terahertz Waveforms Measured by Photconductive and Electrooptic Sampling J. IEEE Journal of Quantum Electronics 1999 35(5): 810-819
- [62] GALLOT G GRISCHKOWSKY D Electro-optic Detection of Terahertz Radiation J. J Opt Soc Am B 1999 16(8): 1204-1212
- [63] DAI JIANMING XIE XU ZHANG X-C Detection of Broadband Terahertz Waves with a Laser Induced Plasma in Gases J. Physical Review Letters 2006 97(10): 103903-1-4
- [64] YU M TRETYAKOV TRETYAKOVA S E et al Transmission-Type Harmonic Mixer of MM-wave Range J. Int J Infrared and Millimeter Waves 2007 28: 839-847
- [65] DAVIES S R Receiver Technology for Terahertz Astronomy J. IEEE 1997 15: 3/1-3/5
- [66] CHEREDNICHENKO S DRAKNSKIY V Low Noises Hot-Electron Bolometer Mixers for Terahertz Frequencies J. J Low Temp Phys 2008 15: 575-579
- [67] MARCEL J E GOLAŹ APACOMATIC Infrared Detection J. The Review of Scientific Instruments 1947 18(5): 357-362
- [68] MICHAEL S SHUR VICTOR RYZHIJ New Concepts for Submillimeter-wave Detection and Generation C. 11th GAAS Symposium Munich 2003
- [69] WOJCIECH KNAP JERZY LUSAKOWSKI FREDERIC TEPPE et al Terahertz Emission and Detection by Plasma Waves in Nanometer Size Field Effect Transistors J. IEEE Transactions 2006 E89-C(7): 926-930
- [70] KOMIYAMA S ASTAFIEV Q ANTONOV V et al A Single-Photon Detector in the Far Infrared Range J. Nature 2000 403: 405-407
- [71] NAG B R Physics of Quantum Well Devices Solid-state Science and Technology Library M. Berlin Springer 2002
- [72] LIU C DUDEK R OOGARAH T et al SWEEP AWAY J. IEEE Circuits and Devices Magazine 2003 9-16

(下转第 237 页)

- Hot Electron Bolometer Mixers at Submillimeter Wavelengths[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2001, 11(1): 641-644
- [17] 张兴宁. 太赫兹应用技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
- [18] NJOKU E G. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth from SPAC[J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(7): 728-750
- [19] SALOMONOVICH A E, BAKUN V N, KOVALEV V S, et al. A Submillimeter Telescope for the Orbital Piled Station Saljut6[J]. Telecommunication and Radio Engineering 1979, 33-34(5): 82-88
- [20] NEUGEBAUER G, BECKMAN C A, AND SOIFER B T, et al. Early Results from the Infrared Astronomical Satellite[J]. Science, 1984, 224(4644): 14-21.
- [21] WATERS J W, READ W G, FROIDEVAUX L, et al. The UARS and EOS Microwave Limb Sounder (MLS) Experiments[J]. Journal of the Atmospheric Science, 1999, 56(2): 194-218
- [22] KESSLER M F, SIENZ J A, AND ANDEREGG M E, et al. The Infrared Space Observatory (ISO) mission[J]. Astronomy and Astrophysics, 1996, 315(2): L27-L31.
- [23] ASHBY M L N, BERGNEA, FLUME R, CARPENTER J M, et al. An Analysis of Water Line Profiles in star Formation Regions Observed by the Submillimeter Wave Astronomy Satellite[J]. The Astrophysical Journal, 2000, 539, L115-L118
- [24] EKSTROM M, ERIKSSON P, RYDBERG B, et al. First Odin Sub-mm Retrievals in the Tropical Upper Troposphere: humidity and Cloud ice Signals[J]. Atmos Chem Phys, 2007, 7: 459-469
- [25] GULKIS S, FRERKING M, CROVISIER J, et al. MRO Microwave Instrument for Rosetta Orbiter[J]. Space Science Reviews, 2007, 128(1-4): 561-597
- [26] MELNICK G J, STAUFFER J R, ASHBY M L N, et al. The Submillimeter Wave Astronomy Satellite: Science Objectives and Instrument Description[J]. Astrophysical Journal, 2000, 539, L77-L85
- [27] KOSHELETS V P, SHILOV S V, ERMAKOV A B, et al. Superconducting Integrated Receiver for TELIS[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 960-963

作者简介



戴宁(1959—)男,江苏六合人,研究员,博士生导师,主要研究领域包括半导体低维结构材料及其光电、生物学特性,铁电、铁磁功能薄膜,太赫兹光谱及成像, E-mail: nda@mail.sitp.ac.cn

葛进(1980—)男,湖南常德人,博士研究生,主要研究方向为太赫兹时域光谱,气体转动谱线;

胡淑红(1973—),女,四川绵阳人,博士,副研究员,主要从事异质外延薄膜、光电材料、光电器件物理及 ZnTe 晶体生长、THz 相关研究领域等方面的研究工作;

张雷(1978—),男,江苏海门人,博士,副研究员,电子科学与工程研究组组长,研究方向为信息工程与电子科学技术、卫星工程与导航定位研究。

(上接第 230 页)

- [73] CHEN HOU-TONG, WILLE J, PADILLA, et al. Active Terahertz Metamaterial Devices[J]. Nature, 2006, 444, 597-600
- [74] DANIEL MITTMELMAN. A Terahertz Modulator[J]. Nature, 2006, 444, 560-561.
- [75] CHEN HOU-TONG, WILLE J, PADILLA, et al. A Metamaterial Solid-state Terahertz Phase Modulator[J]. Nature Photonics, 2009, 3, 148-151.

作者简介



牧凯军(1982—)男,河南郑州人,博士研究生,主要研究方向为太赫兹光谱与成像, E-mail: m8285@126.com

张振伟(1977—)男,北京人,实验师,主要研究领域为太赫兹光谱与成像;

张存林(1961—),男,北京人,教授,博士生导师,研究领域为太赫兹光谱、太赫兹成像,太赫兹与红外热波无损检测、太赫兹与物质相互作用。