

文章编号: 1672-8785(2006)01-0011-05

太赫兹技术及其应用研究的进展

胡永生, 陈 钱

(南京理工大学电光学院, 南京 210094)

摘 要: 过去十年来, 太赫兹技术理论研究的蓬勃发展带动了太赫兹波应用领域的迅速扩大。本文概述了太赫兹波的产生、探测技术等基础研究现状, 重点介绍了近年来太赫兹波在物体成像、环境监测、军事和通信、医学和生物及其它几个应用领域的研究进展和最新研究成果。

关键词: 太赫兹波; 远红外; 太赫兹 TDS; 太赫兹成像

中图分类号: O434.3 **文献标识码:** A

Recent Development of Terahertz Technology and Its Applications

HU Yong-sheng, CHEN Qian

(Nanjing Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210094, China)

Abstract: Reflecting the flourishing development of terahertz theoretical research in the past decade, the domain of terahertz applications is extending rapidly. This paper briefly summarizes the current techniques used to generate and detect terahertz wave. Recent development and latest effort of terahertz technology in object imaging, environment inspecting, military and communication, medicine and biology and other applications are mainly presented.

Key words: terahertz wave; far infrared; THz TDS; T-ray imaging

1 引言

太赫兹波 (Terahertz, $30\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$) 在早期的电磁波谱划分中属于远红外和亚微波的重叠区域, 但是科学家把微波和红外领域成熟的技术应用在太赫兹波段时, 效果却并不理想。太赫兹波在近十年中之所以重新成为电磁波谱研究的热点, 是由于新技术的发展为太赫兹波提供了可靠稳定的光源和探测器。许多方面的应用需求, 包括射电天文、医疗诊断、生物医学、材料特性研究等, 又进一步加快了太赫兹波产生、探测新技术的诞生。在过去的十年中, 无论是太赫兹光源的功率、光束质量和稳定性, 还是探测器

的灵敏度都有了很大的提高。

2 太赫兹技术概述

太赫兹波的产生和探测技术^[1,2]是太赫兹技术的两个重要研究热点, 目前还没有哪一种技术占有绝对的优势。下面介绍一些比较有潜力的太赫兹波产生和探测技术。

自由电子激光器 (FEL)^[3]是目前性能最好的电磁波辐射源, 其发光机制是一束接近光束的超短电子流通过具有空间变化的强磁场时自发辐射电磁波, 直接将电子流的动能转化为光能。通过调整入射电子的能量, 可以得到从 X 射线到远红外的辐射。目前太赫兹波段 20W 的自

收稿日期: 2005-07-11

作者简介: 胡永生 (1979—), 男, 2004 年 7 月获哈尔滨工业大学光学工程专业硕士学位, 现为南京理工大学电光学院博士研究生。主要研究方向为光电信息处理、实时图像处理等。

由电子激光器在美国杰斐逊实验室建造成功, 光束的峰值功率达到 2.7kW, 频率范围为 0.1THz ~ 5THz。通过改进, 系统的最大输出功率将大于 100W^[4,5]。另外据报道, 俄罗斯新西伯利亚的 120 μ m ~ 180 μ m 自由电子激光器的平均功率达到了 200W, 最大峰值功率为 0.6MW, 可以发射重复频率为 5.6MHz、宽度为 50ps 的脉冲^[6]。自由电子激光在要求高信噪比和太赫兹的非线性研究中有很大的应用前景, 但是由于设备体积庞大, 造价昂贵, 并不适合一般的研究实验和商业使用。

差频技术是另一种很有潜力的太赫兹光源, 它通过激光泵浦非线性电光晶体产生太赫兹波。其发光机制是, 当频率 ω_1 和 ω_2 很接近的两束光入射到非线性电光晶体时, 会辐射频率为 $\omega_1 - \omega_2$ 的电磁波, 所以这种技术有时也被称为光整流或光学参变辐射技术^[7]。这种技术产生的太赫兹波的功率一般较小 (mW 级), 但是它可以和自由电子激光器一样工作在常温下。通过采用不同的介质材料, 它已经实现了较大功率的辐射。目前有很多实验室都采用这种技术作为太赫兹光源。Kawase 等人^[8] 用掺杂的 LiNbO₃ 实现了 0.7THz ~ 3THz 频率范围 100mW 的峰值输出。W. Shi 等人用新型材料如 ZnGeP₂ 得到了峰值大于 10W 的太赫兹辐射^[9]; 有人用中心波长为 1.06 μ m、功率为 17mW/cm² 的 Nd : YAG 激光器得到了 36W 峰值输出的辐射, 太赫兹波的频率范围为 1.26THz ~ 4.1THz^[10]。

量子级联激光器自从 1971 年由 Kazarinov 提出^[11] 以后, 也已经在太赫兹波段完成了不少成功实验。2002 年, 两个欧洲工作小组宣布在 40K 实现了 4.4THz 的太赫兹脉冲^[12,13]。2003 年 3 月美国麻省理工学院发表论文, 宣布在液氮温度下实现了 6.8THz 的太赫兹辐射^[14]。最近的研究将量子级联激光器的脉冲辐射的工作温度提高到了 137K, 功率达到了 50mW^[15], 连续辐射方式也可以在 93K 下工作^[16]。由于易于控制太赫兹辐射的频率带宽, 如果能在其低温工作和使用寿命上取得突破, 量子级联激光器的应用前景将非常广泛。

太赫兹波的探测也存在许多正在使用的技术。使用 InSb 或 GaAs 材料的半导体测热辐射计是一种传统的方法, 这种探测技术需要工作在液氮温度下, 并且只能探测辐射的强度, 这极大地限制了它的应用。在室温环境下, 通常采用自由空间电光采样技术^[17,18], 这种技术的噪声等效功率为 10^{-15} W/(Hz)^{1/2}。最近, Komiyama 等人^[19] 研究的单光子探测器在 10K 温度下达到了 10^{-22} W/(Hz)^{1/2} 的等效噪声功率。

3 太赫兹技术的应用

虽然太赫兹波的产生和探测技术只在近几年才取得一定的成果, 而且目前还没有适当功率的小型化商品出现, 但太赫兹技术的应用早已得到同步开展。这主要归功于太赫兹波在某些应用领域的不可替代性。例如, 很多干燥的非极性非金属材料在太赫兹波段的穿透性很强; 太赫兹波的能量很低 (1THz 约 4eV), 对有机组织无伤害; 太赫兹脉冲的宽度一般在亚皮秒级, 信噪比高, 适合瞬态研究; 采用太赫兹 TDS 技术^[17,18] 可以直接测量太赫兹波电磁场的相位和振幅。正是太赫兹波的这些特性才使它在许多领域受到了重视。

3.1 太赫兹波成像

太赫兹波成像技术 (T-ray Imaging) 相对于可见光和 X 射线有非常强的互补特征, 其穿透能力介于两者之间, 又不会对人体或生物组织造成伤害。太赫兹波在材料研究、安检、生物和医学中的各种成像应用是目前开展得最广泛的研究。

太赫兹波成像技术可以利用相位信息进行成像, 许多干电介质对太赫兹波段基本是透明的, 但是折射率不同会引起太赫兹波相位的变化, 从而实现对不同材料的鉴别。例如使用太赫兹波成像技术在车站、机场对行李或旅客进行安检就非常理想, 它可以准确地检查刀具、枪支、炸药及非法药品毒品等^[19-21]。对细胞水平的生物组织进行成像, 主要是测量不同组织及其含水量对太赫兹波的吸收引起能量的变化, 例如皮癌^[22] 及其它组织表层病变的早期诊断等。通过太赫兹 TDS 技术还可以同时探测太

赫兹波的相位和振幅变化信息, 可以实现对材料光谱特性的研究, 例如测定掺杂半导体载流子的富集度和迁移率^[23]和研究高温超导材料的特性^[24]等。

对于太赫兹成像技术的分辨率, 由于瑞利极限将系统的远场分辨率限定在太赫兹波波长, 即约 0.3mm, 要提高空间分辨率就只有采用近场成像的方法^[25]。贝尔实验室的 Mitrofanov 等人用中心波长为 600 μm 的太赫兹波, 得到了 7 μm 的空间分辨率^[26]; Yamashita 等人在对大规模集成电路进行成像时实现了 3 μm 的分辨率^[27]。近场成像技术的分辨率仅与光学系统的孔径有关, 这不仅提高了太赫兹波成像系统的分辨率, 也扩大了太赫兹系统的应用领域。

3.2 军事安全

如前所述, 由于太赫兹波对材料的敏感性, 太赫兹技术可以广泛用于机场、码头等部门及国土安全检测^[28,29]。美国 RPI 学院进行的太赫兹波探测地雷试验, 在 10m 的范围达到了 2mm 的精度^[30]。另外有关太赫兹波炸药探测和生化武器监测的研究也正在开展^[31-33]。

太赫兹波的大气传输特性如图 1 所示, 在 870 μm 、735 μm 、620 μm 、450 μm 、350 μm 附近存在着相对透明的窗口。由图 1 可以看出, 太赫兹波在军事领域的吸引力并不在于它的灵敏度, 而是它可以提供更高的空间分辨率或减小孔径尺寸。但是由于水分和生物目标引起的衰减, 太赫兹波的远距离遥感需要高灵敏度的探测器。例如, 在 100m 的距离使用 1 cm^2 的探测器, 就只能接收辐射到目标上的太赫兹波能量

的 10^{-7} 。对于太赫兹遥感技术来说, 单光子探测器是比较合适的探测技术, 但是目前这种探测器还需要低温技术。

由于军事应用要求有高能的光源、高灵敏度的探测技术和高稳定性的系统, 目前实验中采用的太赫兹系统大多都不能够直接用于军事用途。但是由于太赫兹波具有比毫米波更好的方向性和高的空间分辨率、比红外光更大的带宽和容量, 太赫兹波用于军事和通信还是有很大的前景的, 尤其是在太空环境下。

3.3 生物医学

太赫兹系统在医学领域有广泛的应用空间。除了前面提到的癌症诊断外, 还可以采用反射型系统进行太赫兹断层扫描成像^[35]。太赫兹系统还有可能在外科手术中用于实时检查癌组织切除状况, 使患者避免复发或切除健康组织的危险; 太赫兹还可以得到比超声波更清晰的软组织成像, 以方便医生研究伤口愈合、肿瘤生长等情况。

由于许多蛋白质和 DNA 大分子的集体振动模式都是在太赫兹区, 利用太赫兹 TDS 系统研究生物分子日益成为热点^[36]。2000 年, Markelz 等人首次利用脉冲太赫兹波研究了 DNA、牛血清和胶原质三种生物分子的太赫兹光谱吸收, 并且取得了与比尔-兰波特定律一致的结论^[37]。随后, 通过太赫兹 TDS 揭示生物分子的构象和研究分子突变、分子结构变化过程的工作便开始得到广泛开展^[38]。利用太赫兹波直接检测基因物质的结合情况, 可以实现无标记、高效率的基因探测技术和基因芯片检测手段, 从而避免

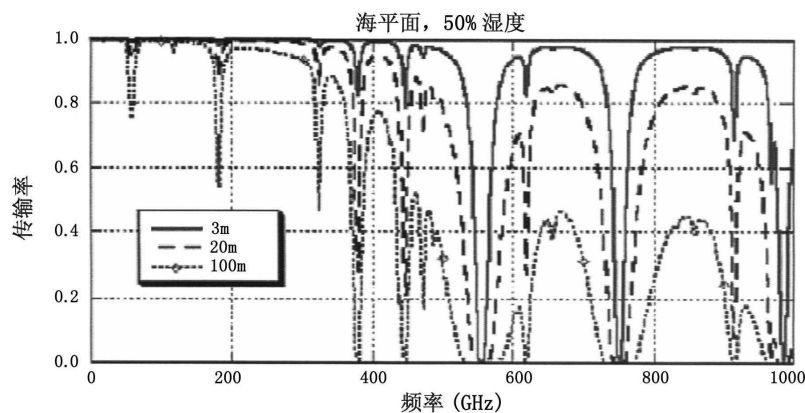


图 1 太赫兹波的海平面大气传输特性^[34]

在基因检测中因使用荧光标记 DNA 链带来的复杂性, 提高检测效率。

太赫兹在生物学上的其它用途还有: 研究药物和细胞的相互作用来指导药物生产; DNA 电荷传递分子机制的超快过程研究; 核酸的电子转移超快过程研究等。

3.4 天文物理

天文学是太赫兹技术的另一个非常重要的应用领域。天体和星际辐射包含了星际形成过程和星际介质化学性质的丰富信息, 而太赫兹波段的观测要比其它波段有更低的背景噪声。随着太赫兹技术的发展, 天文学家 and 天体物理学家对太赫兹波段天文观测的兴趣日益增加。

目前世界上已经建造了多台太赫兹波段的射电望远镜, 用于研究银河系星际云中复杂的物理状态及结构。如德国马·普射电所和美国亚利桑那州天文台合作研制了一台 10m 直径的亚毫米波射电望远镜。2002 年, Bourdin 等人对通过星际辐射的分解来观察星系的远红外到微波辐射^[39]。2003 年, Eyal 等人在南极阿蒙森海工作站的 1.7m 直径的亚毫米波望远镜上用 1.25THz ~ 1.5THz 波段的太赫兹探测器 (TREND) 进行了天文观测^[40], 由于南极干燥稀薄的大气层, 这个波段将是地基望远镜可以达到最好观测效果的波段。另外正在进行的两个项目 SOFIA 和 TELIS 两个空基望远镜, 分别以飞机和探空气球作为平台, 前者工作在 1.76THz ~ 1.84THz, 后者工作在 1.4THz ~ 1.9THz、2.6THz 和 4.9THz 三个波段^[41,42]。到 2007 年, 还计划发射 HERSCHEL 太空望远镜到近地轨道, 上面的两个测辐射热仪将工作在 60 μ m ~ 210 μ m 和 200 μ m ~ 670 μ m 两个波段。这些都是俄罗斯、欧洲和美国之间进行的国际合作项目。

4 展望

目前美国和欧洲在太赫兹技术领域具有领先优势, 约有一百个研究小组对太赫兹的基础理论和各种应用研究开展了广泛的讨论和实验。在亚洲地区, 日本理化研究所 (RIKEN) 已成为世界太赫兹技术的重要交流中心之一; 韩国和中国台湾地区也相继开展了太赫兹相关光电子

材料、THz 激光器、太赫兹光谱学和太赫兹生物医学成像等研究^[43]。在国内, 太赫兹研究也已受到了极大的重视。中国科学院的物理所和上海微系统与信息技术研究所、上海应用物理研究所、首都师范大学物理系等研究机构在太赫兹相关领域开展了工作, 并初步建成了太赫兹实验装置。

进入 21 世纪以来, 太赫兹波的产生和探测技术取得了突破性进展, 太赫兹科学技术进入了加速发展时期。作为一个具有广泛应用前景的新兴学科, 在可以预见的将来, 太赫兹技术将和电磁波谱的其它波段一样, 给人类的社会生活带来深远的影响。

参考文献

- [1] Ken Suto, Jun-ichi Nishizawa. Developments of Terahertz Wave Generation Technologies [C]. Proc. of SPIE. 2004, Vol.5401: 311-319.
- [2] Charles A. Schmuttenmaer. Exploring Dynamics in the Far-Infrared with Terahertz Spectroscopy [J]. Chem. Rev.2004, 104: 1759-1779.
- [3] Van der Weide D W, Murakowski J, Keilmann F. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2002, 48: 740.
- [4] Neil, George R., Carr, G.L., et al. Production of high power femtosecond terahertz radiation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003, 507: 537-540.
- [5] Neil, George R., Williams, G.P. Evolution of the high power THz source program at Jefferson Lab [J]. Infrared Physics and Technology. 2004. 45: 389-391.
- [6] E. A. Antokhin, R. R. Akberdin, V.S. Arbuzov, et al. Probl. At. Sci. Technol. 2004, 3.
- [7] M. A. Piestrup, R. N. Fleming, R. H. Pantell. Continuous tunable submillimeter wave source [J]. Appl. Phys. Lett. 1975, 26: 418.
- [8] Kodo Kawase, Jun-ichi Shikata, Hiromasa Ito. Terahertz wave parametric source [J]. Appl. Phys. Lett. 2001, 34: 1-14.
- [9] W. Shi, Y. J. Ding, N. Fernelius, and K. Vodopyanov. OPt. Lett. 2002, 27: 1454.
- [10] W. Shi, Yujie J. Ding. Appl. Phys. Lett. 2003, 83: 848.
- [11] F. Kazarinov und R. A. Suris. Possibility of the Amplification of Electromagnetic Waves in a Semiconductor with a Superlattice [J]. Sov. Phys. Semicond. 19715, 5: 707.

- [12] R. Kohler, A. Tridicucci, F. Beltram, et al. *Nature*. 2002, 417: 156.
- [13] M. Rochat, L. Ajili, H. Willenberg, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81: 1381.
- [14] B. S. Williams, H. Callebaut, S. Kumar, et al. *Phys. Lett.* 2003, 82: 1015.
- [15] B. S. Williams, S. Kumar, et al. Terahertz quantum-cascade laser operating up to 137 K [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2003, 83: 5142–5144.
- [16] S. Kumar, B. S. Williams, et al. Continuous-wave operation of terahertz quantum cascade lasers above liquid-nitrogen [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2004, 84: 2494–2496.
- [17] Fattinger Ch, Grischkowsky D. *Appl. Phys. Lett.* 1988, 53: 1480.
- [18] M. C. Nuss, J. Orenstein. Terahertz time-domain spectroscopy. *Millimeter-Wave Spectroscopy of Solid*. ser. Springer Topics in Applied Physics. Springer, 1998: 74.
- [19] Clery D. Brainstorming their way to an imaging revolution [J]. *Science*. 2002, 297: 761–763.
- [20] Zimdar D. Fiber-pigtailed terahertz time domain spectroscopy instrumentation for package inspection and security imaging [C]. *Proc. of SPIE*. 2004, 5070: 108–116.
- [21] Cook DJ, Decker BK, Dadusc G, et al. Through container THz sensing: applications for explosives screening [C]. *Proc. of SPIE*. 2004, 5354: 55–62.
- [22] Woodward R M, et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*. 2001, 7: 600.
- [23] van Exter M, Grischkowsky D. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1990, 38: 1684.
- [24] Kaindl R A, et al. *Phys. Rev. Lett.* 2002, 88: 027003.
- [25] Yuan, T., Xu, J.Z., Zhang, X.-C. Development of terahertz wave microscopes [J]. *Infrared Physics and Technology*. 2004, 45: 417–425.
- [26] O. Mitrofanov, I. Brener, M.C. Wanke, et al. *Appl. Phys. Lett.* 2000, 77: 591–593.
- [27] Masatsugu Yamashita, Kodo Kawase and Chiko Otani. *Optical Society of America*. 2005, 13: 115–120.
- [28] David Zimdars, Jeffrey S. White. Terahertz reflection imaging for package and personnel inspection [C]. *Proc. of SPIE*. 2004, 5411: 78–83.
- [29] Ruth M. Woodward, Roger Appleby. Terahertz and millimetre wave technology in port and harbour security [C]. *Proc. of SPIE*. 2005, 5780: 145–152.
- [30] Hua Zhong, Nick Karpowicz, et al. Terahertz Wave Imaging for Landmine Detection [C]. *Proc. of SPIE*. 2004, 5411: 33–44.
- [31] Yunqing Chen, Haibo Liu, et al. Spectroscopic characterization of explosives in the far infrared region [C]. *Proc. of SPIE*. 2004, 5411: 1–8.
- [32] D. Woolard, T. Globus, et al. THz Transmission Spectroscopy as a Novel Technique for Biological Agent Detection [C]. *Proceedings to the 9th International Conference on Terahertz Electronics*, The University of Virginia, Charlottesville, VA, Oct.15–16 (2001).
- [33] Mike Gross, Nicholas Cunningham, et al. Bioaerosol Sampling System with Replicated Optics [C]. *Proc. of SPIE*. 2004, 5411: 136–149.
- [34] E. N. Grossman, A. Luukanen, et al. Terahertz Active Detection Imagers [C]. *Proc. of SPIE. Terahertz for Military and Security Applications II*. 2004, 5411: 68–77.
- [35] Ferguson B, Wang S H, Gray D, et al. Tray computed tomography [J]. *Optics Letters*. 2002, 27: 1312–1314.
- [36] Weiwei Yue, Weining Wang, et al. THz Pulse Spectroscopy of Biological Molecules [C]. *Proc. of SPIE*. 2005, 5640: 568–578.
- [37] A. G. Markelz, A. Roitberg, et al. *Chem. Phys. Lett.* 2000, 320: 42–48.
- [38] Torosyan G., Nerkarayan K., et al. Application of narrow band tunable THz-radiation for biomedical sensing [A]. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology-proceeding* [C]. 2002, 3: 2335–2336.
- [39] Bourdin, Hervé, Boulanger, et al. Cold Dust and Very Cold Excess Emission in the Galaxy [J]. *Astrophysics and Space Science*. 2002, 281: 243–246.
- [40] Eyal Gerecht, Sigfrid Yngvesson, et al. TREND - a low noise terahertz receiver user instrument for AST/RO at the South Pole. *Millimeter and Submillimeter Detectors for Astronomy* [C]. *Proc. of SPIE*. 2003, 4855: 574–582.
- [41] U. Graf, S. Heyminck, D. Rabanus, et al. STAR: SOFIA Terahertz Array Receiver [C]. *Proc. of SPIE. Airborne Telescope Systems II*, Kona, 2002, 4857.
- [42] G. N. Gol'tsman, D. N. Loudkov. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2003, 46: 604–617.
- [43] Ci-Ling Pan. An Overview of THz Research Activities in TaiWan [C]. *Proc. of SPIE*. 2005, 5727: 74–81.