

文章编号:1001-5078(2012)12-1367-05

· 太赫兹技术 ·

太赫兹波探测技术的研究进展

宋淑芳

(华北光电研究所,北京 100015)

摘要:太赫兹波具有优越的特性,使其在物理、化学、生物医学、天文学、材料科学和环境科学等方面有重要的学术和应用价值,以及对国民经济发展、国家安全、反恐和新一代信息科学技术有重大的推动作用,作为太赫兹技术应用的关键器件之一的太赫兹探测器同样到了迅猛的发展。文章介绍了太赫兹探测技术的原理及其应用,并在此基础上分析了太赫兹探测器的最新进展、性能和发展趋势。

关键词:太赫兹波;探测器;探测响应率

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.12.011

Development of the terahertz detection techniques

SONG Shu-fang

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Terahertz technology is playing an important role in many fields, such as physics, chemistry, astronomy, medical science, material science and environment science due to its unique characteristics. It has also boosted the progress of national economics, national security and new informational science. The Terahertz detector is a key aspect of terahertz technology. In this article, the principles and applications of terahertz detectors are introduced, and the developing trend is discussed.

Key words: terahertz wave; detectors; responsivity

1 引言

太赫兹 (THz) 辐射通常指的是波长在 $30\ \mu\text{m} \sim 3\ \text{mm}$ ($0.1 \sim 10\ \text{THz}$) 区间的电磁辐射,其波段位于电磁波谱中的微波和红外光之间。在很长一段时间里,由于缺乏有效的太赫兹辐射产生和检测方法,对于该波段电磁辐射性质的了解非常有限,被称为电磁波谱中的“太赫兹空白”,各波段电磁波光谱图如图1所示^[1-2]。从物理学看,太赫兹波处于电子学向光子学的过渡区域;从应用角度看,太赫兹波在光谱学和成像领域,例如天文、遥感探测、生物成像、秘密武器和毒品探测等等都有广泛的应用。20世纪80年代初期,随着皮秒、飞秒激光源的迅速发展,各种产生太赫兹电磁辐射的光电子技术也应运而生,极大地促进了太赫兹辐射的产生机理、检测技术和应用技术的研究,使太赫兹波段迅速形成一门新的

极具活力的研究领域,以至于在2004年被美国《技术评论》杂志评为科学研究和发展的九个开拓性新型领域之一。

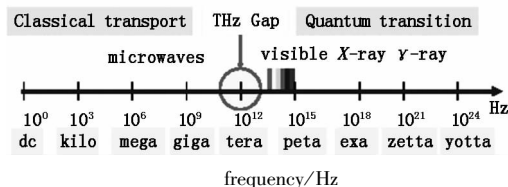


图1 各波段电磁波光谱图

2 太赫兹电磁波的特点及其在军事方面的应用

太赫兹技术之所以具有特别的吸引力,是由于太赫兹辐射有如下特点:约50%的宇宙空间的光子

作者简介:宋淑芳(1971-),女,博士,高级工程师,主要从事Ⅲ-V族半导体材料器件的设计,制备和测试。E-mail: sfsong@center.njtu.edu.cn

收稿日期:2012-02-16; **修订日期:**2012-03-27

能量、大量的星际分子的特征谱线在太赫兹范围内;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太赫兹范围内;太赫兹辐射能穿透非金属和非极性材料,能穿透烟雾和浮尘;太赫兹光子能量小,不会引起生物组织的光致电离。因此,太赫兹技术在物体成像、环境监测、医疗诊断、射线天文、宽带通讯、雷达等领域具有重大的科学价值和广阔的应用前景^[1-7]。

2.1 太赫兹雷达

在雷达遥感探测方面,太赫兹波能够实现比微波和毫米波更高分辨率、更精确定位和成像,在对军事目标进行侦察、识别及精确制导方面的应用有很大的潜力。利用太赫兹波方向性强、能量集中的特点,可制作高分辨率的战场雷达和低仰角的跟踪雷达;利用太赫兹波穿透物质成像技术,可以探测隐藏在覆盖物或烟雾中的军事装备;利用太赫兹穿透沙尘烟雾的能力,可以制作全天候导航系统,在浓雾中指挥飞机着陆;太赫兹波的频谱宽,可跨越目前隐身技术所能对抗的波段,因此以太赫兹波作为辐射源的超宽带雷达能够获取隐身飞机的图像;同时因为有机生物大分子在太赫兹频段都有特征吸收谱,所以太赫兹波也是利用雷达进行遥感探测并预警生化武器威胁的理想工具。

2.2 太赫兹通信

在无线电通信方面,太赫兹特别适合于宽带移动通信及空间通信,是下一代通信技术关注的重点。国际通信联盟已指定 0.12 THz 和 0.22 THz 的频段分别用于下一代地面无线通信(移动电话)和卫星间通信。另外,在短距离内太赫兹通信具有很强的抗干扰能力,可实现在局域战争中近距离的保密通信。

2.3 太赫兹安全检查

太赫兹安全检查是一种结合太赫兹光谱技术、太赫兹成像技术的综合应用,可用于毒品、爆炸物、大分子生物以及武器、炸弹的探测,对公共安全和国土防御起到重要的作用。太赫兹光谱和成像技术不同于 X 射线和超声波成像等手段,不仅可以提供物体形状,而且测得的光谱信息与已有的爆炸物和毒品的太赫兹库进行比较,可用于材料特性识别,进而分析物质的内部结构信息。太赫兹波可以穿透衣物、纸张、塑料、皮革和陶瓷等绝缘材料,而且光子能量低,不会在生物组织中产生有害的光致电离。因此,太赫兹成像技术是探测人员藏匿及包装内隐蔽危险物的一种极具竞争力的方法,可以在机场、车站等地对行李、物品、旅客进行安全检测。尤其对一些

塑料泡沫等绝缘材料内部的缺陷和裂痕等进行无损检测和成像,在战略导弹和航空、航天结构材料的检测和评估方面具有重要的应用价值。如对航天飞机燃料舱的隔热材料进行有效的无损探伤,已被美国宇航局选择为发射中缺陷和检测的技术之一。

3 太赫兹探测技术

太赫兹波信号的探测是一个非常活跃的研究领域,由于太赫兹源发射功率低,与相对较高的热背景耦合,需要高灵敏度的探测手段。目前太赫兹的探测技术主要分为主动式和被动式^[8]。

3.1 主动式探测技术

主动探测技术是基于太赫兹时域光谱(THz - TDS)而发展起来的光电导天线探测技术及电光晶体探测技术。

3.1.1 光电导天线

光电导天线由两根蒸镀在半导体基片上的平行电极组成,如图 2 所示。当波长为 800 nm 的飞秒激光入射到半导体基片上的平行电极之间的区域时,会使天线基底产生大量的自由载流子。太赫兹源发出的脉冲太赫兹电场如果这时也入射到了天线表面,就会将载流子驱向天线的两极,使外接的电流指示器产生读数。当自由载流子的寿命远小于太赫兹脉冲周期时,近似认为由飞秒探测激光束激发的自由载流子受到一个恒定电场的作用,电流指示器所示的电流强度与太赫兹电场成线性关系,从而记录下光电流的变化也就记录下了太赫兹脉冲电场的时域波形。最常用的光电导天线是在低温生长的 LT - GaAs, Si, 半绝缘的 InP 等作为工作介质上制作的,探测器的工作频率一般在 0.1 ~ 20 THz,带宽约为 2 THz。它的噪声等效功率(NEP)可以达到 10^{-15} 。

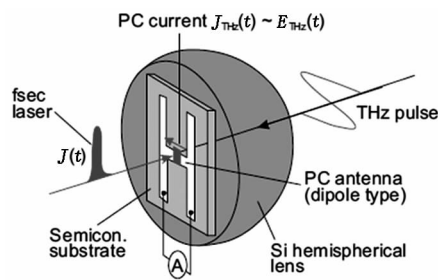


图2 光电导天线探测器结构图

3.1.2 电光晶体探测

电光晶体探测的过程与光电导天线相仿,使用的器件是具有电光效应的晶体。太赫兹辐射电场改变了晶体的折射系数,从而使得晶体具有双折射性质,因此线偏振的探测激光束与太赫兹电场作用后

变为椭圆偏振光,测量通过晶体探测激光束的椭圆度就能获得太赫兹电场辐射强度。常用的电光晶体主要有 ZnTe,ZnSe,CdTe,LiTaO₃,GaP 等,其中 ZnTe 电光晶体在灵敏度、测试带宽和稳定性等方面的性能优于其他晶体。电光晶体探测器有较宽的工作频率 0.1~100 THz,带宽约为 10 THz,它的噪声等效功率(NEP)和光电导天线相当达到 10⁻¹⁵。

光电导天线和电光晶体探测都可用来测量太赫兹脉冲,对于低频太赫兹信号(小于 3 THz)和低斩波频率(千赫兹量级),光电导天线有较高的信噪比,然而对于高频斩波技术,电光晶体可以大大降低噪声,因此频率大于 3 THz,光电导天线的可用性大大降低,而电光晶体仍有很高的灵敏度。电光晶体获得的波形明显比光电导天线的窄,同时电光晶体的探测频率谱较宽,探测带宽较宽。

3.2 被动式探测技术

被动探测技术主要分为直接探测和外差探测技术。直接探测技术是探测太赫兹波的振幅,如图 3 所示,探测器同时探测到了信号辐射(W_s)和背景辐射(W_b),太赫兹波经聚焦透镜聚焦在探测器上,引起电信号的变化,经放大器后产生光电流信号 I_s 。直接探测主要包括热辐射计(Bolometer)、热膨胀式探测盒(Golay)、肖特基二极管直接探测器等。外差探测技术是将太赫兹信号频率下转换变为中频(Intermediate frequency)信号,因此保留了探测信号的振幅和相位的信息。如图 4 所示,通过 Diplexer 将信号辐射(W_s)和本地振荡信号(W_{LO})非线性耦合,进入到探测器的基本元件——混频器(Mixer)进行差频,输出中频信号,该中频信号经过一个特定的滤

波器滤波后再进行放大,就可实现待测信息的获取。外差探测技术主要包括外差式肖特基混频器、超导-绝缘-超导结混频器(SIS)和热电子辐射混频器(HEB)。

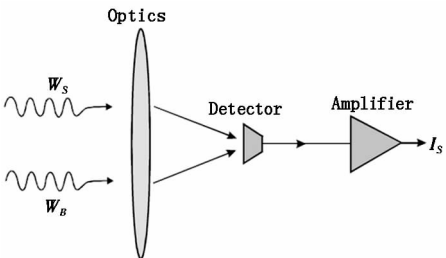


图 3 直接探测示意图

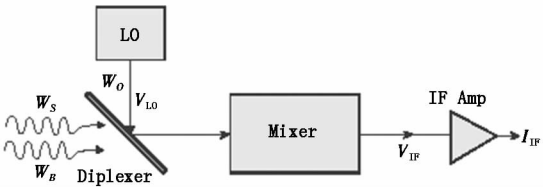


图 4 外差式探测示意图

表 1 比较了常用的太赫兹探测器。主动探测方式的光电导天线和电光晶体探测器应用在脉冲太赫兹技术中,它们可以摒除环境噪声的影响,从而获得较高信噪比的测量结果,而且可以进行相干测量,但是它们的工作范围较窄;热辐射计和高莱盒式两种测热式的直接探测器,可以探测各种光源发射的太赫兹辐射,而且可以测量各种光谱范围的辐射,但是与外差探测技术相比,它们的探测灵敏度较低,而且容易受到环境辐射的影响;以电子学混频器为基础的外差探测技术,是一种非常灵敏的探测器,然而它们的结构较复杂,测量效果不但受到混频器的限制,而且受到本地振荡器的影响。

表 1 太赫兹波探测器的比较

探测器	工作频率范围/THz	噪声等效功率/(W·Hz ^{-1/2})	相干性	响应速度	工作温度
光电导天线	0.1~20	10 ⁻¹⁵	相干	~100 fs	常温
电光晶体	0.1~100	10 ⁻¹⁵	相干	~10 fs	常温
热辐射计	0.1~100	10 ⁻¹⁵ ~10 ⁻¹²	非相干	~ms	液氮
高莱盒	0.1~1000	10 ⁻¹⁰	非相干	~100 ms	常温
肖特基二极管(直接)	<1.8	10 ⁻¹³ ~10 ⁻¹⁰	相干	~ps	常温
外差式肖特基二极管	由本地振荡器决定	10 ⁻¹⁹	相干	~ps	常温
超导-绝缘体-超导混频器	由本地振荡器决定	10 ⁻²¹	相干	~ps	液氮
热电子辐射热计	由本地振荡器决定	10 ⁻²¹	相干	ps~ns	液氮

4 国内外研究进展

1995 年,Bell 实验室发明第一套太赫兹成像装置,从此太赫兹受到了学术界的关注^[9],2002 年,剑桥大学发明了高性能的太赫兹量子级联激光器^[10],

同年牛津大学首次利用太赫兹技术检测出人体隐藏的匕首^[11]。从此太赫兹技术的研究进入到繁荣时期,各国对太赫兹研究项目持续进行了大规模的资金支持。

美国 Rensselaer Polytechnic 研究所成立了由张希成教授领导的太赫兹技术研究项目组,在太赫兹波的发射和探测、光谱和成像以及三维成像技术等方面都进行了众多研究,ZOMEGA 公司将其研究成果产业化,主要生产太赫兹谱分析系统、成像系统,目前其一款产品 Mini Z 已具备了机载检测的可能^[12]。由美国 Michigan 大学和 Stanford 大学孵化出的 Picometrix 公司主要生产太赫兹系统 T-Ray 4000 检查宇宙飞船外壁板内部缺陷,已投入使用^[13]。英国 Rutherford 国家实验室(RAL)及欧洲宇航局(ESA)建立的 ThruVision 公司,开发出一种主动式太赫兹成像仪-T8000 安全摄影系统,可以实时成像,检查隐藏在衣服下面的武器^[14],另外开发研制了世界上最先进的被动探测系统 TS5,探测距离达到 30 m。英国剑桥大学建立的 TeraView Ltd. 高科技公司生产的太赫兹远红外傅里叶光谱仪 TSP Spectra 3000,主要用于物质的太赫兹特征研究^[15]。上述的产品大多数是以主动探测方式为基础,利用光电导天线探测或电光晶体探测实现成像,标志着太赫兹科学技术逐步走向实用化和商品化的标志。

美国国家航天局(NASA)和欧洲宇航局(ESA)已于 2009 年初发射了 Herschel 太空望远镜,其中包括光学、射电以及太赫兹探测系统,可以连续工作 3 年,其成果远远超过以光学望远镜为主的哈勃望远镜系统^[16]。Herschel 太空望远镜是第一个用于远红外和亚毫米波波长的冷宇宙天文卫星,主要的探测器包括 PACS 和 SPIRE 两个红外波段的热辐射计及 HIFI 远红外外差接收装置,HIFI 为高分辨外差分光计,结合使用超导-绝缘体-超导混频器(SIS)(Bands 15;480 GHz~1.250 THz)与热电子辐射热计(HEB)(Bands 6~7;1.4~1.9 THz 和 2.4~2.7 THz)进行混频。

我国在太赫兹波段的探测主要是研制以超导-绝缘体-超导混频器(SIS)、热电子辐射热计(HEB)混频器为前级的太赫兹波段接收机,并实际使用于天文和环境监测等方面。中科院紫金山天文台和南京大学是我国先开展超导探测技术的两个主要单位,目前具备了从薄膜和结的制备,到薄膜和结在太赫兹辐射下的物理特性研究,以及最终形成器件的一整套技术能力,为超导太赫兹检测技术的研究打下了良好的基础^[17-18]。

不同频率应选择不同的探测器,在太赫兹低端,一般倾向于外差式的探测器,目前用于接收信号的

混频器以肖特基二极管为主,随着超导-绝缘体-超导混频器(SIS)与热电子辐射热计(HEB)技术逐步成熟,这两种高灵敏度混频器将在未来应用中占据主导地位;在太赫兹的高端,直接探测器的灵敏度似乎更胜一筹。

5 结束语

随着太赫兹技术的广泛应用,对太赫兹波探测器的灵敏度和频率分辨率等性能也提出了越来越高的要求。由于太赫兹辐射源的低输出功率和太赫兹频率范围内较高的热辐射背景噪声等因素,因此在不同适用环境和工作范围内各种太赫兹探测器相互补充,使得太赫兹探测逐渐从实验室走向天文、环境检测、军事等领域。

目前太赫兹光谱的成像通常采用逐点扫描的方法实现,获取数据时间较长,工作效率低,难以适应快速、准确的成像要求,因而焦平面阵列探测将是获得太赫兹图像的理想方法。焦平面阵列探测方法是采用连续的太赫兹射线,经镜头聚焦射线穿过物体,用远红外焦平面阵列摄取太赫兹反射或透射的强弱变化后得到太赫兹图像。现在远红外焦平面太赫兹波段的响应还很低,而且太赫兹射线能量较弱,因此提高焦平面阵列探测组件的响应率和获得大功率的太赫兹源将成为科研人员研究的热点和难点。

参考文献:

- [1] Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz science technology and application [M]. Beijing: Peking University Press, 2007. (in Chinese)
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.
- [2] Zhang Cunlin. Terahertz sensing and imaging [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] Zhang Zhenlin, Mu Kaijun, Zhang Cunlin. Military application of terahertz science and technology [J]. Science and Technology, 2009, 8: 11-16. (in Chinese)
张振林, 牧凯军, 张存林. 太赫兹科学技术的军事应用[J]. 科学技术, 2009, 8: 11-16.
- [4] Zhang Huaiwu. Research on terahertz science and technology in China [J]. Chinese Basic Science, 2008, 1: 15-20. (in Chinese)
张怀武. 我国太赫兹基础研究[J]. 中国基础科学, 2008, 1: 15-20.
- [5] Dai Ning, Ge Jin, Hu Shuhong, et al. The development of the terahertz detection techniques in the applications of

- remote sensing [J]. Journal of CAEIT, 2009, 4(3): 231 – 237. (in Chinese)
- 戴宁, 葛进, 胡淑红, 等. 太赫兹探测技术在遥感应用中的研究进展 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 231 – 237.
- [6] Liu Shenggang, Zhong Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's application [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481 – 486. (in Chinese)
- 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展 [J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481 – 486.
- [7] Yao Jianquan, Chi Nan, Yang Pengfei, et al. Study and outlook of terahertz communication thchnology [J]. Chinese Journal of Laser, 2009, 36(9): 2213 – 2233. (in Chinese)
- 姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞, 等. 太赫兹通信技术的研究和展望 [J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2213 – 2233.
- [8] Sizov F, Rogalski A. THz detectors [J]. Progress in Quantum Electronics, 2010, 34: 278 – 347.
- [9] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. Optics Lett., 1995, 20: 1716 – 1718.
- [10] Kohler R, Tredicacci A, Beltram F. Terahertz semiconductor heterostructure laser [J]. Nature, 2002, 417: 156 – 159.
- [11] Clery D. Terahertz on a chip [J]. Science, 2002, 297(2): 763.
- [12] Brain Schulkin, X-C Zhang. Time domain spectrometers expand toward new horizons [J/OL]. Laser Focus World, 2006, 89. <http://www.z-thz.com>.
- [13] Irl Duling, David Zimdars. Revealing hidden defects [J/OL]. Nature Photonic, 2009, 3: 630 – 632. <http://www.picometrix.com>.
- [14] Chris Mann. Solid state detector arrays for terahertz application [J/OL]. Proc. SPIE, 2006, 6212: 62120W. <http://www.thruvision.com>.
- [15] Kemp M C, Glauser A, Baker C, et al. Recent developments in people screening using terahertz technology seeing the world thtyough terahertz eyes [J/OL]. Proc. SPIE, 2006, 6212: 62120T <http://www.teraview.com>.
- [16] Mattia Negrello, R Hopwood, G De Zotti. The detection of a population of submillimeter bright strongly lensed galaxies [J/OL]. Science, 2010, 330: 800 – 804. <http://www.herschel.esac.esa.int>.
- [17] Zhang W, Gao J R, Khosropanah P, et al. NbN hot electron bolometer mixer at 5.3 THz [J]. Proc. SPIE, 2010, 7741: 77411B.
- [18] Shan Wenlei, Takeda M, Kojima T, et al. Low noise waveguide type NbN/AlN/NbN SIS mixers approaching terahertz frequencies [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(4): 841 – 848.