

太赫兹焦平面阵列成像技术综述*

牟进超, 乔海东, 刘 婕, 康 忱, 黄 辉, 张振华, 李凉海
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 太赫兹焦平面阵列成像技术是指以太赫兹波为载波或信息来源, 以焦平面阵列为主体架构, 兼具全天时全天候、凝视前视、高分辨率、实时视频成像等优点的先进探测感知技术, 是太赫兹技术领域重要研究方向。首先回顾了太赫兹探测感知技术的发展历程与现状, 重点介绍了几类典型太赫兹探测感知系统。然后, 重点聚焦太赫兹焦平面阵列成像技术, 分别介绍了太赫兹低频段 ($<1\text{ THz}$) 和太赫兹高频段 ($>1\text{ THz}$) 焦平面阵列国内外现状。最后, 对像素级太赫兹探测器的一般性概念和发展趋势进行了总结和展望。

关键词: 太赫兹; 太赫兹焦平面阵列成像; 像素级太赫兹探测器

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)05-0004-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210617001

引用格式: 牟进超, 乔海东, 刘婕, 等. 太赫兹焦平面阵列成像技术综述[J]. 遥测遥控, 2021, 42(5): 43–54.

Review on terahertz focal plane array imaging technology

MOU Jinchao, QIAO Haidong, LIU Di, KANG Chen, HUANG Hui, ZHANG Zhenhua, LI Lianghai
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Terahertz focal plane array imaging technology is an advanced detection and sensing technology, which takes the terahertz wave as the carrier or information source, takes the focal plane array as the main architecture, and has the advantages of all-weather, staring forward, high-resolution, real-time video imaging and so on. It is one of the main branches of terahertz research region. This paper first reviews the development history and the state-of-the-art of terahertz detection and sensing technology and several typical terahertz systems are highlighted. Then, the terahertz focal plane array imaging technology is reviewed, including low terahertz band ($<1\text{ THz}$) and high terahertz band ($>1\text{ THz}$) focal plane arrays. Finally, some consideration and suggestion are illustrated.

Key words: Terahertz; Terahertz focal plane array imaging; Pixel-level terahertz detector

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210617001

Citation: MOU Jinchao, QIAO Haidong, LIU Di, et al. Review on terahertz focal plane array imaging technology [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(5): 43–54.

引 言

太赫兹波是最后一段被集中开发利用的电磁频谱, 位于微波与红外波段之间, 其广义频率范围为 $0.1\text{ THz}\sim10\text{ THz}$, 对应波长范围为 $0.03\text{ mm}\sim3\text{ mm}$ 。早期的太赫兹波在电子学和光学领域中有着不同的名称: 在电子学领域, 太赫兹波被称为“亚毫米波”; 在光学领域, 太赫兹波被称为“远红外”。十九世纪二十年代, 美国学者提出“红外与电波结合”的概念来描述太赫兹波; 1970 年正式出现“太赫兹”一词^[1], 但是从应用角度来说, 更多提及的是“亚毫米波”和“远红外”概念。

人类于 1878 年首次利用辐射热计测量到自然界中的太赫兹辐射^[2], 但在其后的近一百多年时间里, 由于技术难度大且没有明确的应用牵引, 太赫兹波并未得到充分开发利用。直到二十世纪六七十年代, 射电天文学发展才进一步推动了太赫兹技术发展。1987 年, 位于美国夏威夷的 15 m 口径麦克斯韦天文

*基金项目: 中央军委科技委 173 计划重点项目, 北京市科技新星项目 (Z201100006820130)

收稿日期: 2021-06-17 收修改稿日期: 2021-06-18

望远镜正式投入运行, 旨在研究太阳系、星际尘埃等天体^[3]。2003 年, 位于智利阿卡拉玛沙漠的大型毫米波/亚毫米波阵列 ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) 正式奠基, 将用于研究恒星形成以及分子云和早期宇宙的观测^[4]。该阵列工作于 0.035 THz~0.95 THz 内的十个频段。除了地基射电天文装备外, 大气遥感应用需求推动了空天太赫兹技术的发展。2004 年, 美国发射了地球观测系统 Aura 卫星, 其上搭载了工作于 0.118 THz、0.19 THz、0.24 THz、0.64 THz 和 2.5 THz 的微波临边探测器 MLS (Microwave Limb Sounder), 用于研究大气成分、测定大气层中臭氧变化情况等^[5]。

随着微波、红外和可见光等技术日趋成熟, 以美国为代表的军事大国、航天强国迫切需要开拓利用新电磁频谱以维护其制信息权优势。在此历史背景下, 太赫兹波及其相关技术成为二十一世纪各国争相发展的重点。美国于 2004 年将太赫兹定位为“改变未来世界的十大技术”之一并排名第四, 认为太赫兹技术是后摩尔时代信息技术发展的重要支撑。美国喷气动力实验室 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 等国家实验室都在积极发展太赫兹技术。美国国防先进技术研究局 DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency)、美国国家航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 等部门都加大了对太赫兹技术的研究投入, 重点支撑太赫兹单片集成电路、小型化太赫兹源等关键共性技术以及大气遥感、目标探测与识别、生物医疗检测等系统应用技术。欧洲从第五框架计划起, 在近 20 年时间内连续投入数十亿欧元用于太赫兹核心器件与应用技术的发展并在太赫兹产业化方面走在世界前列。日本于 2005 年将太赫兹定位为“未来十项重大支柱技术”首位, 并计划于 2020 年东京奥运会上提供基于太赫兹技术的 100 Gbps 无线局域网服务。日本电报电话公司、东京大学、京都大学、韩国太赫兹应用研究中心等都加大了对太赫兹研究的投入力度。



图 1 太赫兹技术发展历程
Fig. 1 Development of terahertz technology

我国以 2005 年第 270 次香山科学会议 (主题为“太赫兹科学技术的新发展”) 为里程碑, 开启了

国内太赫兹前沿技术的研究热潮^[6]。国内太赫兹技术的发展大致经历了三个阶段：“十一五”期间，以形成概念认知为主，研究主体为高校；“十二五”期间，以关键技术攻关为主，研究主体为高校和中科院所属研究所，部分军工集团研究所也启动了太赫兹研发工作；“十三五”期间，以应用系统研发为主，研究主体除了高校和中科院所属研究所外，军工集团研究院所也积极开展太赫兹研发。“十二五”、“十三五”期间，太赫兹技术得到了科技部、军委科技委、国防科工局、国家自然科学基金委员会等部门的重点支持，设立了包括“太赫兹重要辐射源探测及应用的基础研究”、“新型太赫兹源、接收器和其他关键器件及其应用”、“活细胞的太赫兹波无标记检测技术基础研究”等在内的一系列重点研发计划。中国航天科技集团于2019年组织航天九院704所等所属6家单位完成了《中国航天科技集团有限公司太赫兹综合论证报告》，明确了太赫兹技术在遥感与深空探测、空天感知与攻防、空天通信等三大领域的研究与应用方向。

1 太赫兹探测感知技术

1.1 特点和优势

太赫兹探测感知技术是提升目标探测感知能力的重要支撑，是谋求空天信息优势的重要基础保障，是未来装备和载荷更新换代的技术基础。相比于微波探测，太赫兹探测具有更高的“空时频”分辨力。这意味着从空间维度来说，太赫兹成像分辨率高，同时目标粗糙和细微结构变得可见，能够对目标特征进行精细刻画；从时间维度来说，太赫兹成像帧率高，有利于提升对高速机动目标的成像时效性^[7]；从频率维度来说，太赫兹探测多普勒信息更为明显^[8]，有利于实现低小慢目标的微动探测。相比于红外和可见光探测，太赫兹探测能够穿透烟雾、浮尘、沙土等，对空间高速运动目标的气动光学效应与热环境效应不敏感，环境适应性更强。此外，太赫兹能够更好地适应复杂电磁环境^[9]，系统集成度更好，对小型无人机及其集群、卫星、导弹等平台适应性更好。因此，太赫兹探测感知技术在新域新质目标预警监视、高精度抗干扰精确制导、全天时全天候复杂环境感知等方面具有广阔的应用前景，是谋求空天信息优势的重要基础。

1.2 发展历史与现状

1987年，麦克斯韦射电天文望远镜投入运行，如图2所示。该天文望远镜运行初期包含一个工作于0.33 THz~0.666 THz的宽带接收机和三个分别工作于0.22 THz、0.35 THz以及0.66 THz的窄带谱线接收机。1996年7月，麦克斯韦天文望远镜亚毫米波通用测辐射计阵列SCUBA(Submillimetre Common-User Bolometer Array)投入使用^[10]。SCUBA包含0.35 THz阵列(37个像元)和0.66 THz阵列(91个像元)，通过双波段分光镜实现共口径复用。相比于原先的单通道接收机UKT14^[11]，SCUBA的空间映射速率提升了10 000倍。2008年~2011年，麦克斯韦天文望远镜的SCUBA2逐步投入使用^[12]。相比于SCUBA，SCUBA2双波段阵列探测器的像元个数提升至5 120个，空间映射速率提升了100~150倍。

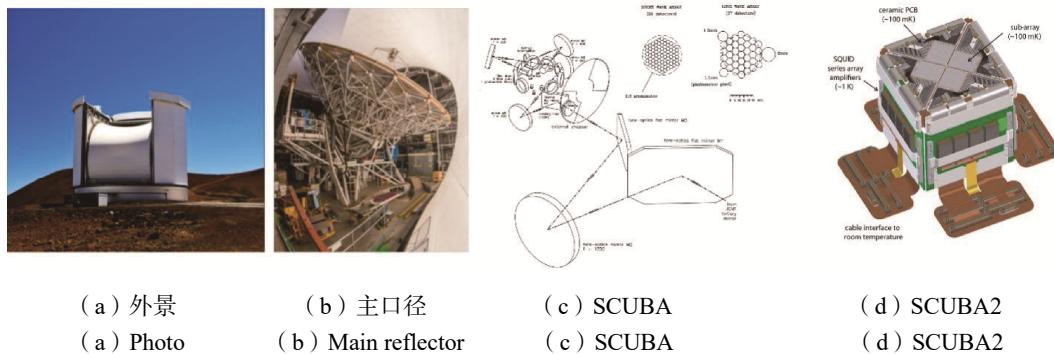


图2 麦克斯韦射电天文望远镜
Fig. 2 James Clerk Maxwell Telescope

1988 年, 美国麻省大学微波遥感实验室研制出中心频率为 215 GHz、发射功率为 60 W 的太赫兹单脉冲雷达^[13]并完成了树木散射特性研究^[14]。1990 年, 该实验室研制出中心频率为 225 GHz 的太赫兹极化雷达^[15]并于 1991 年完成了松树林极化散射特性研究^[16]。

1991 年, 由美国 JPL 研制的高层大气研究卫星 UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) 载荷——微波临边探测器 MLS (Microwave Limb Sounder) 发射成功^[17], 主要用于压力、温度等物理量以及 ClO、H₂O₂、O₃、H₂O 等大气分子测量。UARS MLS 包含 63 GHz、183 GHz、205 GHz 等三个频段辐射计, 如图 3(a) 所示。2004 年, 作为 UARS MLS 升级版的地球观测系统 EOS (Earth Observing System) 微波临边探测器 MLS 发射成功^[18], 相比于 UARS MLS 能够测量更多的大气成分。EOS MLS 包含 118 GHz、190 GHz、240 GHz、640 GHz 以及 2.5 THz 等五个频段辐射计, 如图 3(b) 所示。

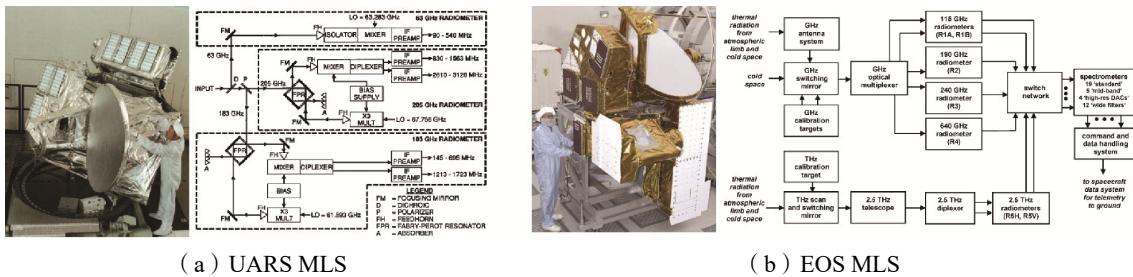


图 3 微波临边探测器
Fig. 3 Microwave limb sounder

2008 年, 美国 JPL 研制出 0.6 THz 太赫兹高分辨率成像雷达^[19], 如图 4 所示, 这是第一部具有高分辨率测距能力雷达系统。该雷达工作于调频连续波体制, 其发射机采用固态倍频链路产生 0.3 mW~0.4 mW 发射功率, 接收机采用肖特基二极管混频器。

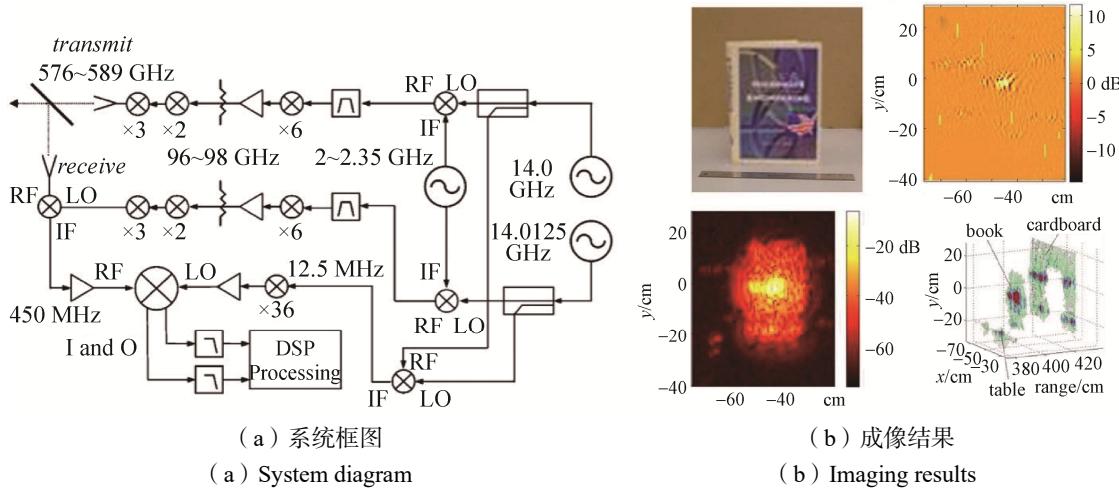


图 4 JPL 0.6 THz 雷达系统框图和成像结果
Fig. 4 JPL 0.6 THz radar system diagram and imaging results

2018 年, 美国雷声公司报道了一款 235 GHz 太赫兹视频合成孔径雷达^[20], 如图 5 所示, 这是 2012 年 DARPA “视频合成孔径成像”项目成果的首次公开报道^[21]。该雷达于 2017 年 4 月至 6 月间在德克萨斯州米德洛锡安的飞行验证中成功展示了低图像延迟、高帧率、高分辨率成像能力, 完成了全天候态势感知能力验证、系统校准和联合导航-自动对焦平台运动补偿、多通道自适应信号处理、杂波目标检测和运动目标特征提取能力。

2016 年, 德国弗劳恩霍夫高频物理和雷达技术研究所研制出 300 GHz 太赫兹合成孔径雷达 (MIRANDA-300)^[22], 其距离分辨率约为 5 mm, 横向分辨率约为 1.35 mm, 如图 6 所示。由于采用了

太赫兹低噪声放大器，该雷达作用距离可以达到百米量级。

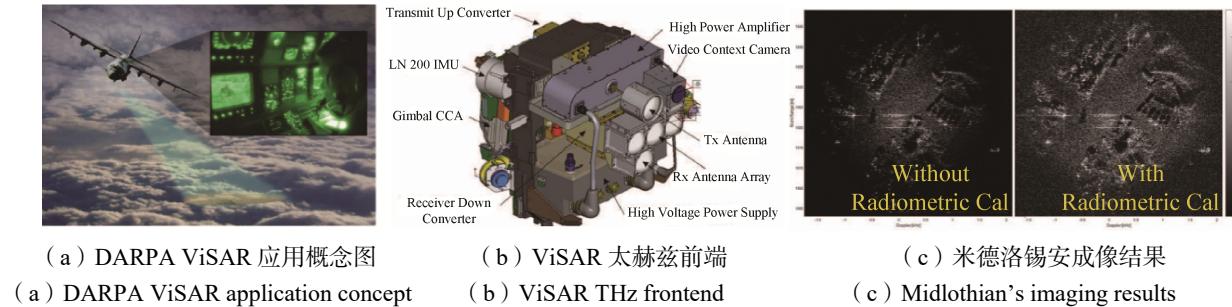


图 5 DARPA 视频合成孔径雷达 ViSAR

Fig. 5 DARPA ViSAR

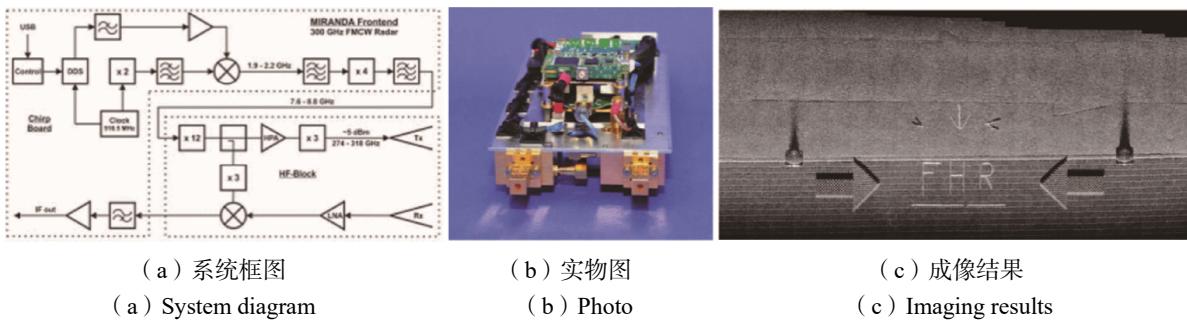


图 6 MIRANDA-300

Fig. 6 MIRANDA-300

2021 年，芬兰 VTT 技术研究中心研制出工作于 5.8 K 温度、主口径为 2 m、阵列规模为 132×66 的被动式太赫兹焦平面阵列成像系统^[23]。该系统的成像距离为 2.5 m，视场为 $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，帧频为 9 Hz，如图 7 所示。

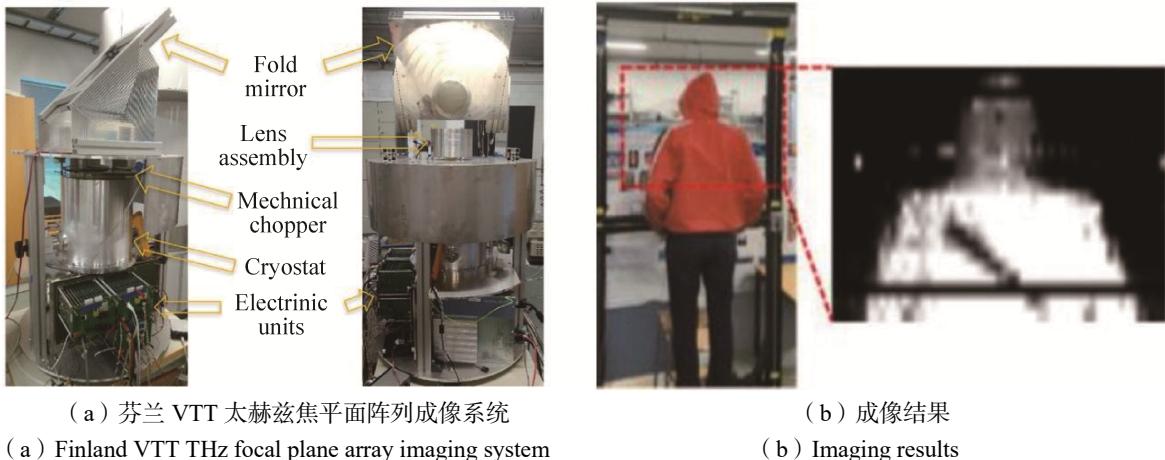


图 7 芬兰 VTT 太赫兹焦平面阵列成像系统和成像结果

Fig. 7 Finland VTT THz focal plane array imaging system and imaging results

国内太赫兹探测感知领域发展也基本上与国际同步。2012 年，北京理工大学吕昕团队研制出 220 GHz 太赫兹脉冲成像系统，纵向分辨率为 3 cm^[24]。2013 年，中国工程物理研究院邓贤进团队研制出 140 GHz 逆合成孔径雷达，其分辨率为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ ，成像帧频为 5 Hz^[25]。2018 年，电子科技大学皮亦鸣团队研制出 340 GHz 太赫兹逆合成孔径雷达^[26]。2020 年，北京遥测技术研究所 173 项目团队在中国航天科技集团第二届创新创意大赛中展示了 220 GHz 太赫兹焦平面阵列成像系统^[27]，其成像分辨率在 3 m 距离处为 7 mm。

2 太赫兹焦平面阵列探测成像技术

太赫兹探测感知技术分类如图 8 所示。根据信号特征可以分为太赫兹脉冲成像^[13]和连续波成像^[19]; 根据源与探测器相对空间关系可以分为太赫兹反射式成像和透射式成像^[11]; 根据阵列规模可以分为太赫兹扫描成像^[18]和凝视成像^[10]; 根据映射关系可以分为实孔径成像^[23]和数字(合成)孔径成像^[21]。

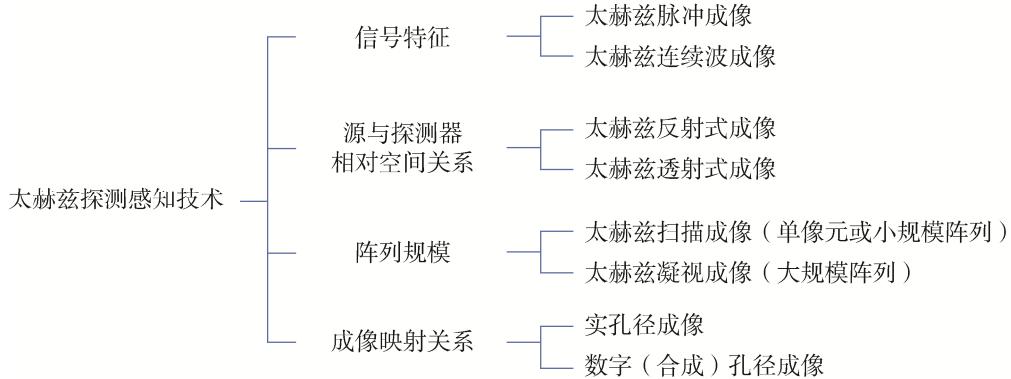


图 8 太赫兹探测感知技术分类

Fig. 8 Classification of terahertz detection and sensing technology

太赫兹焦平面阵列成像技术是指以太赫兹波为载波或信息来源, 以焦平面阵列为主体架构, 兼具全天时全天候、凝视前视、高分辨率、实时视频成像等优点的先进探测感知技术, 属于实孔径成像。太赫兹焦平面阵列成像系统的空间映射关系以及一般性架构如图 9 所示。一般来说, 太赫兹焦平面阵列成像具有三方面优势: ① 成像实时性好, 能够获得高速非合作目标的视频级图像并实现目标群测距; ② 能够获取目标的原始像素级信息, 在信息完成度与深度处理方面优于其他技术途径, 能够为目标识别提供优质信息源; ③ 具备视场、焦距、工作频段等通用化、型谱化、系列化特质, 能够通过灵活改型实现工作频段、阵列规模、视场、作用距离、工作模式等谱系化, 提升太赫兹载荷的通用化、标准化水平。发展高灵敏度、高分辨率的太赫兹焦平面阵列是美国和欧洲太赫兹技术发展重点之一。美国国防高级研究计划局(DARPA)先后设立了“太赫兹焦平面阵列技术”项目(TIFT)、“亚毫米波焦平面成像技术”项目(SWIFT)、“先进扫描成像技术”项目(ASTIR)等, 偏重于航天和国防应用; 欧洲在第七、八框架中先后设立了 TeraScreen、TeraTop 等项目, 偏重于航天和商业应用。

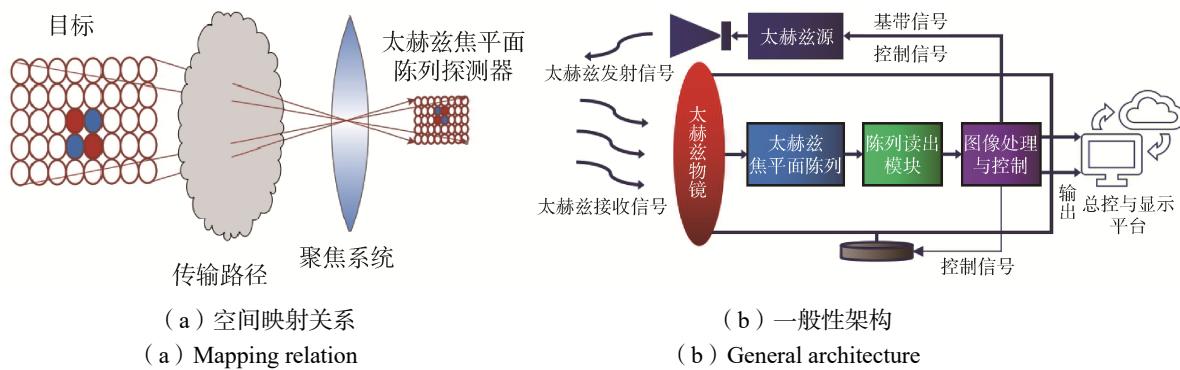


图 9 太赫兹焦平面阵列成像系统

Fig. 9 Terahertz focal plane array imaging system

太赫兹焦平面阵列成像系统的核心为太赫兹焦平面阵列探测器。通常来说, 以 1 THz 为界分为太赫兹低频段(<1 THz, 简称“低频太赫兹”)和太赫兹高频段(>1 THz, 简称“高频太赫兹”)。低频太赫兹焦平面阵列成像以电子学途径为主; 高频太赫兹焦平面阵列成像以光子学/红外途径为主。

2.1 低频太赫兹焦平面阵列成像技术

低频太赫兹焦平面阵列探测器通常指工作频率小于 1 THz, 以电子学途径为主的探测器。根据工作

模式，低频太赫兹焦平面阵列探测器可以分为非相参焦平面阵列探测器和相参焦平面阵列探测器。非相参焦平面探测器工作于直接检波模式，其优点在于系统架构简单，但是仅能得到幅度信息、无法获取相位信息。相参焦平面阵列探测器工作于外差探测模式，其优点在于能够同时获取目标幅度和相位信息，但其阵列级本振馈电与功分网络增加了系统的复杂度。

2009年，德国伍伯塔尔大学高频和通信技术研究所研制了一款基于CMOS工艺太赫兹非相参焦平面阵列芯片^[28]，其阵列规模为 3×5 ，工作于600 GHz频段，噪声等效功率(NEP)最小值为 $400\text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。基于该芯片，该课题组完成了信封内隐匿物品成像实验，如图10所示。2012年，该课题组同样基于CMOS工艺研制出阵列规模为 32×32 的790 GHz~960 GHz太赫兹焦平面阵列芯片，NEP为 $12\text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[29]。2020年，该课题组基于 32×32 阵列太赫兹焦平面阵列芯片完成了多波段成像光路设计与演示^[30]，为多波段焦平面成像提供了创新解决方案。

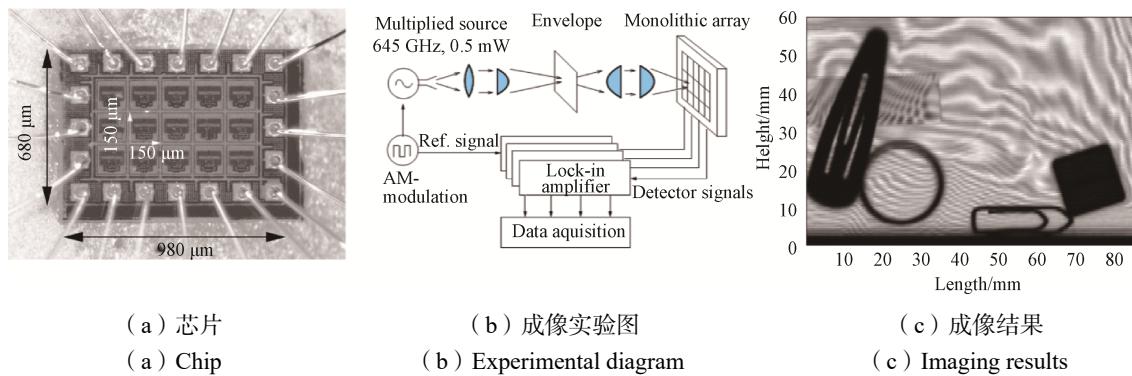


图10 德国伍伯塔尔大学 600 GHz 太赫兹非相参焦平面阵列
Fig. 10 600 GHz non-coherent focal plane array from University of Wuppertal

2013年，美国俄亥俄州立大学电科学实验室研制出基于超快异质结反向二极管的0.6 THz~1.2 THz太赫兹焦平面阵列^[31]，其阵列规模为 80×64 ，成像帧频为5 fps，NEP为 $850\text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。基于该阵列，完成了隐匿物品成像演示^[32]，如图11所示。

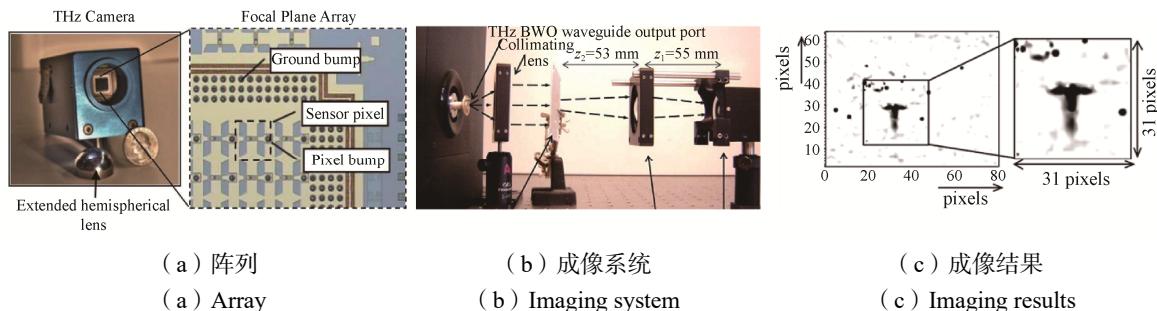


图11 美国俄亥俄州立大学 0.6 THz~1.2 THz 太赫兹焦平面阵列
Fig. 11 0.6 THz~1.2 THz focal plane array from The Ohio State University

2013年，美国麻省理工大学Han等人基于130 nm CMOS工艺研制出280 GHz 4×4 太赫兹非相参焦平面阵列芯片^[33]，其NEP为 $29\text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，如图12所示。基于该芯片，该课题组完成了透射式太赫兹成像实验。2016年，该课题组基于130 nm SiGe工艺研制出320 GHz 8通道太赫兹相参焦平面阵列芯片^[34]，其灵敏度为 $70.1\text{ pW}@1\text{ kHz}$ 。2019年，该课题组基于65 nm CMOS工艺研制出240 GHz 4×8 太赫兹外差接收机阵列^[35]，其变频损耗为39.8 dB，灵敏度为 $58\text{ fW}@1\text{ kHz}$ ，相比于320 GHz 8通道太赫兹相参焦平面阵列芯片灵敏度提高1200倍。

2013年，韩国电子通信研究院太赫兹光子学创新研究中心研制出250 GHz 1×20 太赫兹焦平面阵列探测器^[36]。该探测器以InGaAs肖特基势垒二极管为核心器件，NEP为 $106.6\text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2017年，韩国大

学基于 $130\text{ }\mu\text{m}$ SiGe HBT 研制出 300 GHz 单通道非相参探测芯片和相参探测芯片^[37]。其中, 非相参芯片 NEP 为 $21.2\text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$, 相参芯片 NEP 为 $3.9\text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

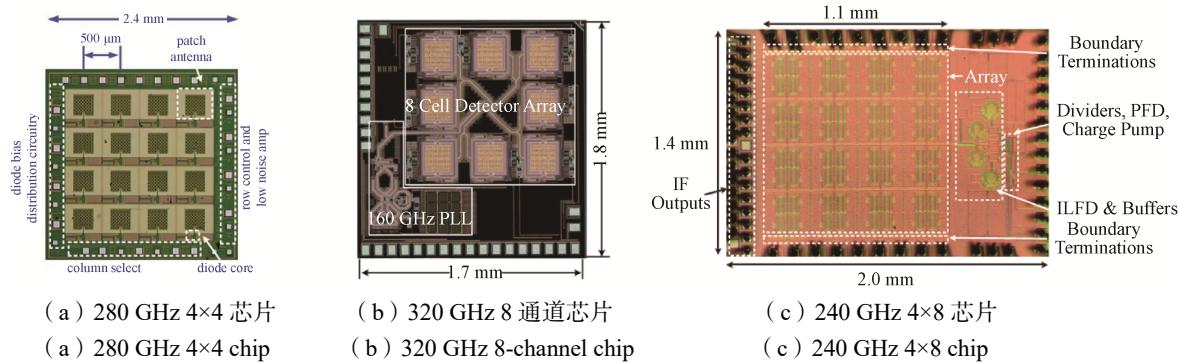


图 12 麻省理工大学研发的芯片

Fig. 12 Chips developed at MIT

2017 年, 华盛顿海军研究实验室基于 130 nm CMOS 肖特基二极管工艺, 研制了 6×6 太赫兹非相参焦平面阵列。该焦平面阵列的工作频率为 218 GHz , 当以锁相体制接收时, 该焦平面阵列在视频帧率下的 NEP 优于 $30\text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

国内, 2014 年, 北京理工大学牟进超等人研制出 220 GHz 1×4 太赫兹相参焦平面阵列芯片, 其最小变频损耗为 18 dB ^[38]。2017 年, 中国科学院半导体所刘力源团队基于 180 nm CMOS 工艺研制出 940 GHz 单通道太赫兹探测器^[39], 其 NEP 为 $1.1\text{ nW}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2018 年, 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所秦华团队采用 AlGaN/GaN HEMT 为核心器件研制出 340 GHz 32×32 太赫兹焦平面阵列芯片, 实现了 30 Hz 帧频的成像演示^[40]。2018 年, 北京遥测技术研究所 173 项目团队研制出 340 GHz 4×4 太赫兹非相参焦平面阵列芯片^[41], 其 NEP 为 $2.1\text{ pW}/\sqrt{\text{Hz}}$; 2019 年, 该团队研制出 220 GHz 6×6 太赫兹非相参焦平面阵列芯片, 并完成 220 GHz 成像演示, 成像分辨率为 7 mm , 如图 13 所示。

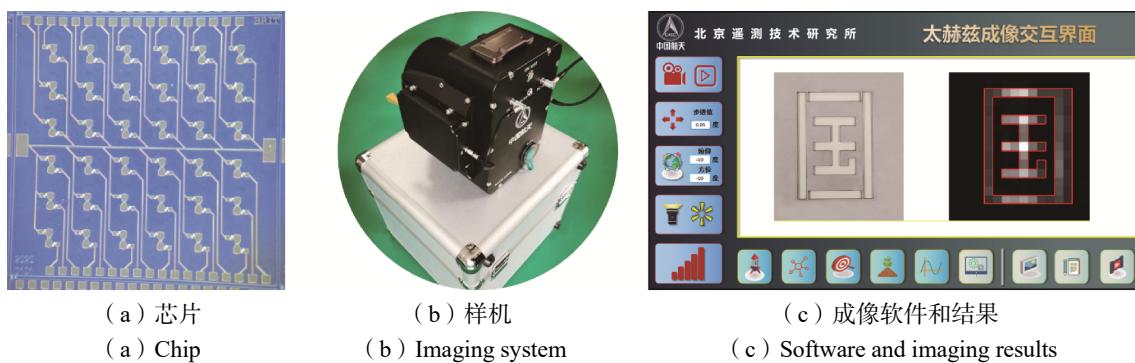


图 13 北京遥测技术研究所研发的芯片

Fig. 13 Chips developed at Beijing Research Institute of Telemetry

2.2 高频太赫兹焦平面阵列成像技术

高频太赫兹焦平面阵列探测器通常指工作频率大于 1 THz , 以光子学或红外技术途径为主的探测器。

2005 年, 美国麻省理工大学胡青教授团队采用英国航空航天公司 (BAE) 产品 SCC 500L VOx 焦平面探测器组件完成了 2.52 THz 太赫兹焦平面成像演示^[42]。焦平面阵列探测器的核心器件为微测辐射热计, 阵列规模为 160×120 , 噪声等效温差 ($\text{NETD}/1.0@30\text{ Hz}$) $<0.05^\circ\text{C}$, 帧频为 60 Hz 。2006 年, 该团队采用 BAE 公司 SCC 500H VOx 焦平面探测器开展焦平面成像实验^[43], 实现了信封中铅笔字及指纹的 4.3 THz 连续波透射和反射成像, 如图 14 所示。相比于 SCC 500L 焦平面阵列探测器, SCC 500H 焦平面阵列探测器的阵列规模更高 (320×240), 密度更大 (单个像元尺寸为 $28\text{ }\mu\text{m}\times 28\text{ }\mu\text{m}$), NETD ($f/1.0@30\text{ Hz}$) $<0.1^\circ\text{C}$, 帧频为 60 Hz 。

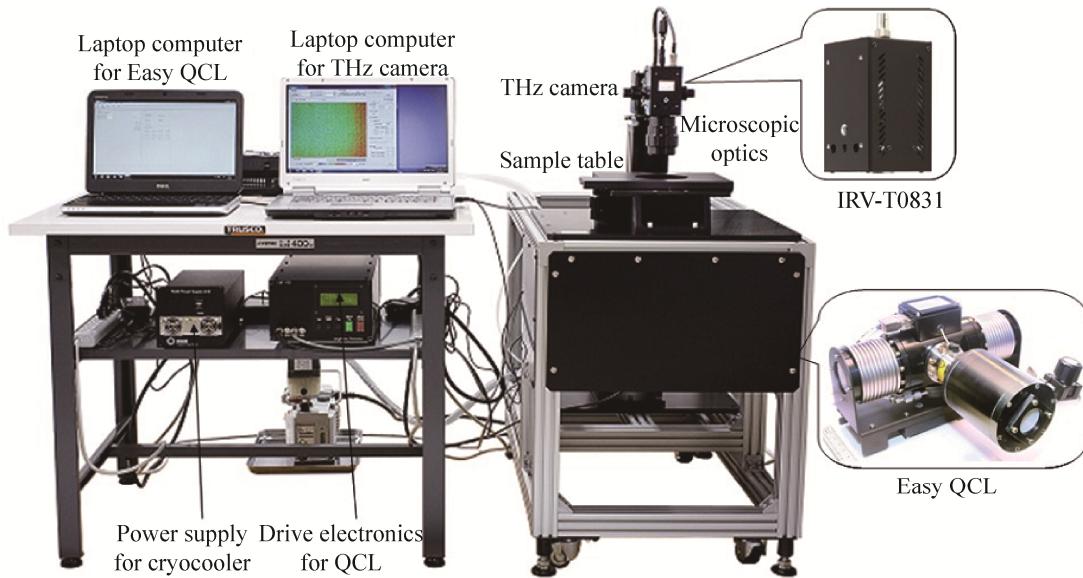


图 14 麻省理工大学 4.3 THz 焦平面成像系统

Fig. 14 MIT 4.3 THz focal plane imaging system

2008 年, 日本电气股份有限公司 (NEC) 在 VO_x 红外焦平面探测器基础上, 优化设计了 VO_x 焦平面探测器的像元微结构^[44]。2011 年, NEC 公司成功研制出基于 VO_x 的宽带和窄带型太赫兹焦平面探测器件, 应用于手持式太赫兹相机^[45]。2012 年, NEC 将太赫兹测试相机应用于测量 THz-TDS 成像系统的太赫兹波束模式^[46], 所采用的焦平面阵列探测器规模为 320×240, 帧频为 60 Hz。同年, NEC 公司推出阵列规模为 320×240、NEP<100 pW@4 THz 的太赫兹焦平面相机 IRV-T0831^[47]。

2010 年, 法国 CEA-Leti 公司研制出 1 THz~5 THz、320×240 太赫兹焦平面阵列探测器, 采用了基于平面天线耦合的测辐射热计^[48], 如图 15 所示。2012 年, 该公司基于上述探测器完成太赫兹成像实验, 成像分辨率为 2 mm^[49]。

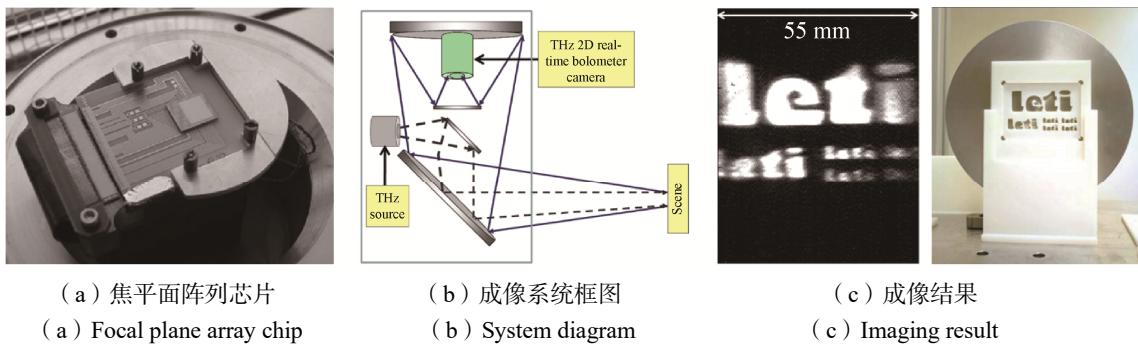


图 15 法国 CAE-Leti 公司研发的焦平面阵列芯片

Fig. 15 Focal plane array chip of CAE-Leti

2017 年, 英国格拉斯哥大学 Ivonne Escorcia 等人使用 CMOS 工艺研制了工作于 2.5 THz 的太赫兹焦平面阵列^[50], 其阵列规模为 64×64。该阵列中的每个像元包含测辐射热计和超材料吸收结构, 像素尺寸为 40 μm×40 μm, 在 2.52 THz 处的 NEP 为 108 pW/√Hz。

3 结束语

3.1 像素级太赫兹探测器的一般性概念

太赫兹焦平面阵列探测器的核心是高灵敏度、高集成度像素级太赫兹探测器。太赫兹探测器, 顾名思义, 具有两个基本功能——“探(感知)”与“测”(测量)。首先, 要完成“探”的功能, 也就是

感知到空间中的太赫兹波(辐射), 实现太赫兹波的耦合并将空间太赫兹波转换成可以进一步测量的物理量。例如, 天线、光电晶体等可以将太赫兹辐射转化成电流形式; 测辐射热计中各种各样材料的吸热板将辐射转化成热形式; 高莱探测器将辐射转化为气体的膨胀等。然后, 要实现“测”的功能, 即实现对变换后的物理量进行定量映射。例如, 肖特基二极管通过输出的电压可以反演出太赫兹辐射能量; 测辐射热计通过热阻效应反演出太赫兹辐射能量。因此, 像素级太赫兹探测器包括信号耦合和信号测量两个基本结构, 基于电子学途径的典型器件为检波天线^[51], 基于红外途径的典型器件为测辐射热计^[52], 如图 16 所示。

3.2 太赫兹焦平面阵列成像技术发展趋势

通过溯源太赫兹技术发展历程并参考微波、红外、可见光成像技术发展历史, 可以预测太赫兹焦平面阵列成像技术将向以下四个方向发展:

① 大规模阵列化: 为了提升成像实时性和宽视场能力, 需要研制更大规模太赫兹焦平面阵列探测器, 从现有少量阵列发展到上百个甚至百万个阵列规模。

② 微系统化: 太赫兹系统与微系统技术相结合具有天然的匹配性。为了满足小卫星、浮空器、无人机等各类平台应用, 太赫兹焦平面阵列成像系统将不断提高集成度并逐步发展成为具有信号处理能力的微系统。

③ 多波段融合: 现有太赫兹焦平面阵列成像系统大部分工作于单一频段, 主要用于空间域成像。然而, 太赫兹频段具有丰富的谱信息, 如果在空间域成像基础上进一步实现“空间域×频谱域”成像, 将极大提升系统的成像识别能力和广泛适用性。

④ 多模复合: 太赫兹非相参成像系统实现简单且功耗低, 适合实现宽视场实时成像, 但是只能获得目标幅度信息; 太赫兹相参成像系统能够同时获得目标幅度和相位信息, 信息更为丰富并具有获得高分辨率成像的潜力, 但是系统实现复杂。通过相参和非相参复合可以有机融合两者优势, 全面提升载荷分辨率、实时性、集成度、识别能力。然而, 目前太赫兹相参焦平面阵列探测器面临诸多挑战, 如等幅/相功分网络、系统的集成度等, 该技术尚是国际难点, 亟需取得突破性和原创性成果。

参考文献

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910–928.
- [2] BARR E S. The infrared pioneers—III. Samuel Pierpont Langley[J]. Infrared Physics, 1963, 3(4): 195–196.
- [3] ROBSON I, HOLLAND W S, FRIBERG P. Celebrating 30 years of science from the James Clerk Maxwell Telescope[J]. Royal Society Open Science, 2017, 4(9): 1–53.
- [4] WOOTTEN A, THOMPSON A R. The Atacama large millimeter/submillimeter array [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8): 1463–1471.
- [5] WATERS J W, FROIDEVAUX L, HARWOOD R S, et al. The earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the AURA satellite[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2006, 44(5): 1075–1092.
- [6] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7–12.
- [7] LIU Shenggang. New development of terahertz science and technology [J]. China Basic Science, 2006, 8(1): 7–12.
- [8] LIU Z, KE S, GARY D E, et al. Video-rate terahertz interferometric and synthetic aperture imaging[J]. Applied Optics, 2009, 48(19): 3788–3795.



图 16 像素级太赫兹探测器的一般概念
Fig. 16 General concept of pixel-level terahertz detector

- [8] JIN Li, PI Yiming, YANG Xiaobo. Micro-Doppler signature feature analysis in terahertz band[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2010, 31(3): 319–328.
- [9] APPLEBY R. Passive millimetre-wave imaging and how it differs from terahertz imaging[J]. *Philosophical Transactions*, 2004, 362(1815): 379–394.
- [10] HOLLAND W S, ROBSON E I, GEAR W K, et al. SCUBA: a common-user submillimetre camera operating on the James Clerk Maxwell Telescope[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010(4): 659–672.
- [11] DUNCAN W D, ROBSON E I, ADE P, et al. A millimetre/submillimetre common user photometer for the James Clerk Maxwell Telescope [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1990(1): 126–132.
- [12] HOLLAND W S, BINTLEY D, CHAPIN E L. SCUBA-2: The 10000 pixel bolometer camera on the James Clerk Maxwell TELESCOPE[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 430(4): 2513–2533.
- [13] MCINTOSH R E, NARAYANAN R M, MEAD J B, et al. Design and performance of a 215 GHz pulsed radar system [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, 36(6): 994–1001.
- [14] NARAYANAN R M, BOREL C C, MCINTOSH R E. Radar backscatter characteristics of trees at 215 GHz [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1988, 26(3): 217–228.
- [15] MEAD J B, MCINTOSH R E. A 225 GHz polarimetric radar[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1990, 38(9): 1252–1258.
- [16] MEAD J B, MCINTOSH R E. Polarimetric backscatter measurements of deciduous and coniferous trees at 225 GHz[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1991, 29(1): 21–28.
- [17] BARATH F T, CHAVEZ M C, COFIELD R E, et al. The upper atmosphere research satellite microwave limb sounder instrument[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1993, 98(D6): 10751–10762.
- [18] WATERS J W, FROIDEVAUX L, HARWOOD R S, et al. The earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the aura satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44(5): 1075–1092.
- [19] COOPER K B, DENGLER R J, CHATTOPADHYAY G, et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE, 2008, 18(1): 64–66.
- [20] KIM S H, FAN R, DOMINSKI F. ViSAR: A 235 GHz radar for airborne applications[C]// 2018 IEEE Radar Conference (Radar Conf 18), 2018: 1549–1554.
- [21] WALLACE H B. Video synthetic aperture radar(ViSAR)[R]. Arlington: DARPA, 2012.
- [22] STANKO S, PALM S, SOMMER R, et al. Millimeter resolution SAR imaging of infrastructure in the lower THz region using MIRANDA-300[C]. Proceedings of the 2016 46th European Microwave Conference, London, 2016.
- [23] LUOMAHAAARA J, SIPOLA H, GRONBERG L, et al. A passive, fully staring THz video camera based on kinetic inductance bolometer arrays[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2021, 11(1): 101–108.
- [24] 胡伟东, 张萌, 穆晨晨, 等. 220 GHz 脉冲成像系统设计与应用研究[J]. 现代科学仪器, 2012, 12(6): 20–22.
HU Weidong, ZHANG Meng, MU Chenchen, et al. Research on pulsed imaging and applications technology at 220 GHz[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2012, 12(6): 20–22.
- [25] CHENG B, GE J, CHENG W, et al. Real-time imaging with a 140 GHz inverse synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(5): 594–605.
- [26] XU Y, PI Y, TONG L, et al. Three-dimensional imaging of space debris with space-based terahertz radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3): 1063–1072.
- [27] 刘诗瑶. 具有广阔应用前景, 服务经济社会发展——一批航天科技成果精彩亮相[N]. 人民日报, 2020-11-2.
- [28] OJEFORS E, PFEIFFER U R, LISAUSKAS A, et al. A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process Technology[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, 44(7): 1968–1976.
- [29] HADI R A, SHERRY H, GRZYB J, et al. A 1 k-pixel video camera for 0.7–1.1 terahertz imaging applications in 65 nm CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid State Circuits*, 2012, 47(12): 2999–3012.
- [30] HEADLAND D, ZATTA R, HILLGER P, et al. Terahertz spectrometer using CMOS camera and dispersive optics[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(5): 513–523.
- [31] TRICHOPOULOS G C, MOSBACKER H L, BURDETTE D, et al. A broadband focal plane array camera for real-time THz imaging applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2013, 61(4): 1733–1740.
- [32] HEADLAND D, ZATTA R, HILLGER P, et al. Terahertz spectrometer using CMOS camera and dispersive optics[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, 10(5): 513–523.
- [33] HAN R, ZHANG Y, KIM Y, et al. Active terahertz imaging using schottky diodes in CMOS: array and 860 GHz pixel[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2013, 48(10): 2296–2308.

- [34] CHEN J, MOSTAJERAN A, HAN R, et al. A fully integrated 320 GHz coherent imaging transceiver in 130 nm SiGe BiCMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51(11): 2596–2609.
- [35] HU Z, WANG C, HAN R. A 32 Unit 240 GHz heterodyne receiver array in 65 nm CMOS with array-wide phase locking[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(5): 1216–1227.
- [36] HAN S P, KO H, PARK J W, et al. InGaAs schottky barrier diode array detector for a real-time compact terahertz line scanner[J]. Optics Express, 2013, 119(20): 97–105.
- [37] YOON D, KIM J, YUN J, et al. 300 GHz direct and heterodyne active imagers based on 0.13 μm SiGe HBT technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017(5): 536–545.
- [38] 牟进超. 太赫兹焦平面成像系统若干关键问题研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- MOU Jinchao. Research on some critical issues of terahertz focal plane imaging systems[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [39] LIU Z Y, LIU L Y, ZHANG Z, et al. Terahertz detector for imaging in 180 nm standard CMOS process[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(8): 202–210.
- [40] 罗木昌, 孙建东, 张志鹏, 等. 基于 AlGaN/GaN 场效应晶体管的太赫兹焦平面成像传感器[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 243–248.
- LUO Muchang, SUN Jiandong, ZHANG Zhipeng, et al. Terahertz focal plane imaging array sensor based on AlGaN/GaN field effect transistors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 243–248.
- [41] MOU J, LI M, LV X, et al. 340 GHz lens-coupled 4×4 GaAs detector array for terahertz imaging applications[J]. Electronics Letters, 2018, 54(20): 1180–1182.
- [42] LEE A W M, HU Q. Real-time continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. Optics Letters, 2005, 30(9): 2563–2565.
- [43] LEE A W, WILLIAMS B S, KUMAR S, et al. Real-time imaging using a 4.3 THz quantum cascade laser and a 320×240 microbolometer focal-plane array[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(13): 1415–1417.
- [44] ODA N, YONEYAMA H, SASAKI T, et al. Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6940: 69402Y.
- [45] ODA N, SANO M, SONODA K, et al. Development of terahertz focal plane arrays and handy camera[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8012: 80121B.
- [46] ODA N, LEE A W, ISHI T, et al. Palm-size terahertz camera and compact quantum cascade laser[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8363: 83630A.
- [47] NEC Corporation. High sensitivity real-time uncooled THz imager and transmission THz microscope[Z]. 2012.
- [48] SIMOENS F, MEILHAN J, POCAS S, et al. THz uncooled microbolometer array development for active imaging and spectroscopy applications[C]. 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz), 2010, 49(8): 1–2.
- [49] SIMOENS F, MEILHAN J, LALANNE-DERA J, et al. Complete THz system for reflection real-time imaging with uncooled antenna-coupled bolometer arrays[C]. 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz), 2012, 24(1): 1–2.
- [50] ESCORCIA I, GRANT J, GOUGH J, et al. CMOS terahertz metamaterial based 64×64 bolometric detector arrays[C]. International Conference on Infrared, 2017: 1–2.
- [51] MOU J, XUE Q, GUO D, et al. A THz detector chip with printed circular cavity as package and enhancement of antenna gain[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(4): 1242–1249.
- [52] ROGALSKI A, SIZOV F. Terahertz detectors and focal plane arrays [J]. Opto-Electronics Review, 2011, 19(3): 346–404.

[作者简介]

- 牟进超 1985 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为太赫兹科学与技术。
- 乔海东 1990 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹探测芯片与微系统技术。
- 刘 娣 1994 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为太赫兹天伺馈与源技术。
- 康 忱 1995 年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为太赫兹成像算法技术。
- 黄 辉 1969 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统设计。
- 张振华 1977 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达与卫星有效载荷技术。
- 李凉海 1965 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统设计。