

## 太赫兹焦平面阵列芯片技术\*

乔海东, 牟进超, 刘 娣, 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具有成像帧率高、凝视前视、实孔径成像的优点, 是太赫兹成像技术中最具有可持续发展价值的技术途径之一。太赫兹焦平面阵列是太赫兹焦平面成像系统中的核心组件, 其性能直接影响太赫兹焦平面阵列成像系统的灵敏度和分辨率。首先, 介绍了太赫兹焦平面阵列的基本概念, 包括系统工作原理、典型架构以及像素级太赫兹探测器; 然后, 分别介绍了检波式太赫兹焦平面阵列和混频式太赫兹焦平面阵列的发展现状; 最后, 总结了太赫兹焦平面阵列的关键技术和发展趋势。

**关键词:** 太赫兹焦平面阵列; 太赫兹焦平面阵列芯片; 像素级太赫兹探测器; 太赫兹检波天线

**中图分类号:** TN385      **文献标识码:** A      **文章编号:** CN11-1780(2021)06-0001-13

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20210817001

**引用格式:** 乔海东, 牟进超, 刘娣, 等. 太赫兹焦平面阵列芯片技术[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 1-13.

### Review on terahertz focal plane array chip technology

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

**Abstract:** Terahertz focal plane array imaging is one of the most promising technology that has the advantages of high frame rate, staring imaging and real aperture imaging. As the core component in the terahertz focal plane imaging system, the terahertz focal plane array determines the sensitivity and resolution of the system. Firstly, the basic concepts of terahertz focal plane array is illustrated, including the system principle, typical architecture and pixel-level terahertz detector. Secondly, state-of-the-art of the terahertz focal plane array in directly-detection mode and mixing mode is presented respectively. Finally, critical technologies and development trends are summarized.

**Key words:** Terahertz focal plane array; Terahertz focal plane array chip; Pixel-level detector; Detectenna

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20210817001

**Citation:** QIAO Haidong, MOU Jinchao, LIU Di, et al. Review on terahertz focal plane array chip technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 1-13.

### 引 言

太赫兹波是指位于微波与红外之间的一段电磁波, 其频率范围通常定义为 0.1 THz~10 THz, 对应波长为 3 mm~30  $\mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>。太赫兹成像感知技术兼具抗干扰能力强、分辨率高、时效性好、光子能量低、穿透性强、光谱信息丰富等优点<sup>[2]</sup>, 因此在深空探测与遥感、目标感知与攻防、无损探伤与隐匿目标成像等方面具有广泛的应用前景<sup>[3-7]</sup>。在各类太赫兹探测感知手段中, 太赫兹焦平面阵列成像兼具成像实时性好、凝视前视等优点, 是太赫兹成像感知技术中应用前景最好、可持续发展潜力最强的技术途径之一。例如, 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<sup>[1]</sup>。

\*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)

本文是太赫兹焦平面阵列成像系列论文之二

收稿日期: 2021-08-17 收修改稿日期: 2021-08-31

## 1 太赫兹焦平面阵列基本概念

图 1 (a) 给出了太赫兹焦平面阵列成像的基本原理, 即阵列中的每个像元与目标上的不同位置实现一一映射, 每个像元独立工作。图 1 (b) 给出了太赫兹焦平面阵列的典型架构, 主要包括微透镜阵列、阵列芯片、中频电路三个部分。通常来说, 太赫兹焦平面阵列可以分为检波和混频两种模式, 如表 1 所示。检波式太赫兹焦平面阵列仅能输出幅度信息, 但是结构简单、无需本振馈电网络, 易于扩展为高密度的焦平面阵列。混频式太赫兹焦平面阵列既可以输出幅度信息, 也可以在与发射信号相参条件下输出相位信息。尽管混频式阵列的硬件复杂度高于检波式阵列, 但是混频式太赫兹焦平面阵列的灵敏度更高, 且可以充分利用相位信息实现多种成像机制的融合<sup>[8]</sup>。

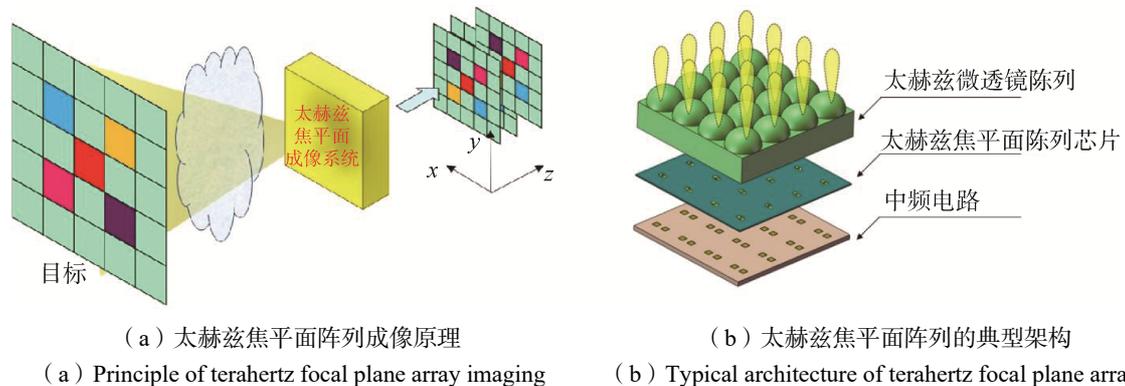


图 1 太赫兹焦平面阵列示意图

Fig. 1 Terahertz focal plane array schematic

表 1 检波式和混频式太赫兹焦平面阵列

Table 1 Detection-type and mixing-type terahertz focal plane arrays

	检波式太赫兹焦平面阵列	混频式太赫兹焦平面阵列
输入信号	太赫兹信号	太赫兹信号
输出信号	基带电压	中频幅度和相位
本振条件	无需本振馈电网络	需要本振馈电网络
典型灵敏度	在 218 GHz 时 950 pW@1 kHz <sup>[9]</sup>	在 240 GHz 时 0.058 pW@1 kHz <sup>[10]</sup>
优点	结构简单、易于扩展大规模阵列	灵敏度高, 可同时获取幅度和相位信息
不足	灵敏度低, 仅能获取幅度信息	结构复杂, 扩展成大规模阵列难度大

为了解决传统波导式太赫兹焦平面阵列存在像元一致性差、集成度低、复杂度和实现成本高等问题<sup>[11]</sup>, 论文[12]提出一种检波天线 Detectenna (Detectenna=Detector+Antenna) 架构, 如图 2 所示。检波天线兼具天线耦合和变频功能, 能够实现高集成度、扁平化的像素级太赫兹探测器以及一致性好的太赫兹焦平面阵列芯片<sup>[13]</sup>。图 3 给出了检波天线的一般性架构, 包括平面天线、非线性器件和具有滤波功能的中频引线<sup>[14]</sup>。通常来说, 检波天线包含射频和中频两个回路: 射频回路负责太赫兹信号的耦合和下变频; 中频回路负责中频信号的滤波和输出。首先, 空间太赫兹信号被检波天线上的平面天线耦合接收, 即实现了太赫兹信号从位移电流向传导电流的形式转换; 然后, 太赫兹电流经过检波天线上的非线性器件, 并利用器件的非线性实现下变频并产生中频电流; 最后, 中频电流经过中频引线输出至信号处理电路上。为了提升检波天线灵敏度, 通常采用介质透镜或反射背腔方式提升检波天线的方向性, 如图 4 所示<sup>[15]</sup>。

## 2 检波式太赫兹焦平面阵列

在直接检波式太赫兹焦平面阵列方面开展研发工作的团队主要包括德国伍伯塔尔大学、美国华盛顿海军研究实验室、北京遥测技术研究所、中国科学院苏州纳米所等。

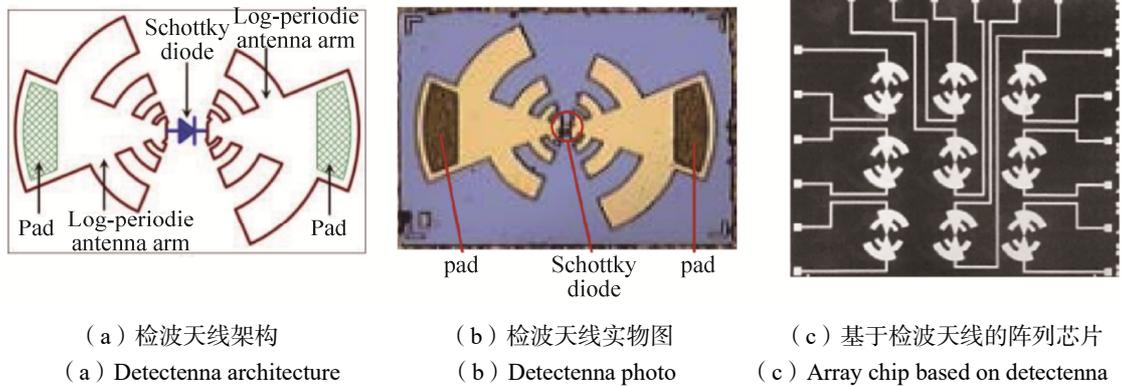


图2 检波天线示意图  
Fig. 2 Detectenna schematic

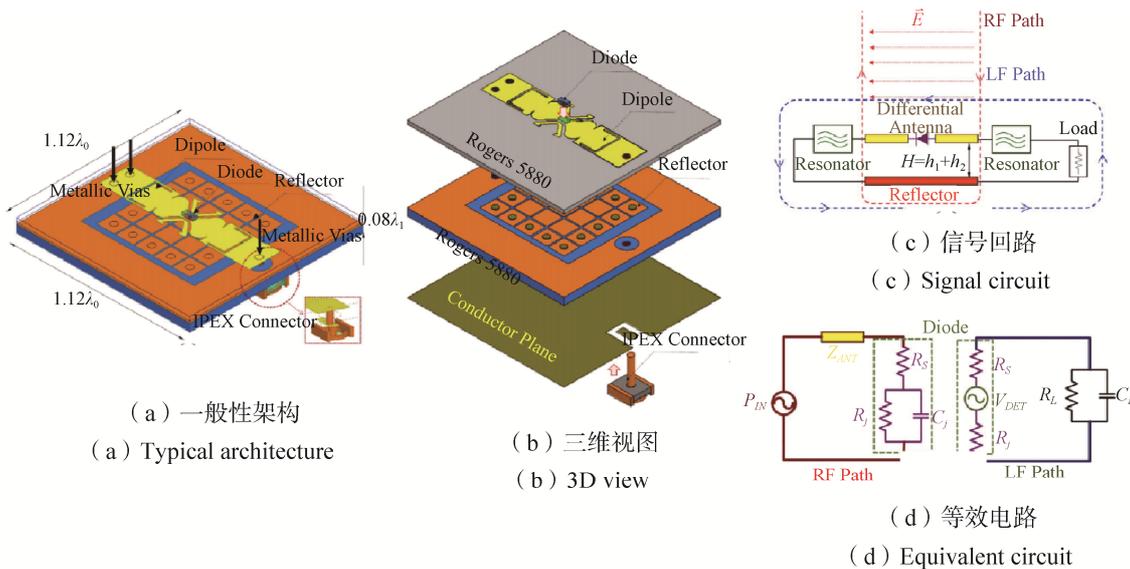


图3 检波天线的一般性架构和工作原理  
Fig. 3 Typical architecture and working principle of detectenna:

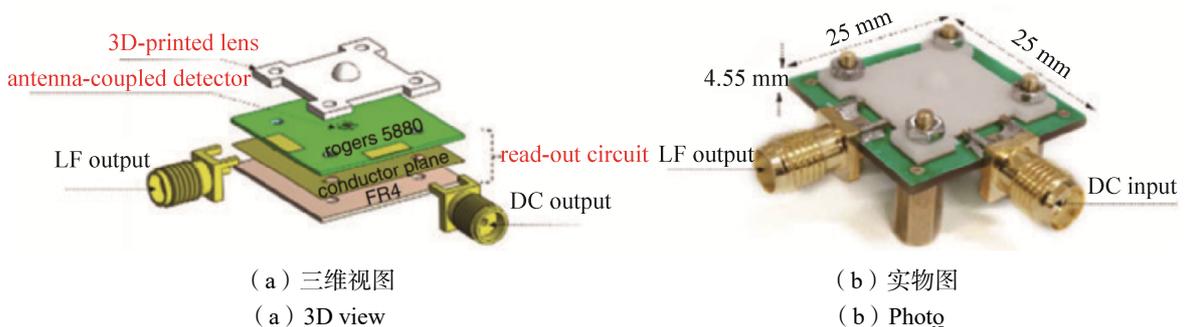


图4 加载介质透镜的检波天线结构  
Fig. 4 Detectenna loaded with dielectric lens

2008年,德国伍伯塔尔大学 Erik Öjefors 等人基于  $0.25\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺研制出  $650\ \text{GHz}$  太赫兹焦平面阵列芯片<sup>[16]</sup>,如图 5(a)所示。该芯片阵列规模为  $3\times 5$ ,像元尺寸为  $200\ \mu\text{m}\times 150\ \mu\text{m}$ ,在加载  $43\ \text{dB}$  中频电压放大器条件下的典型响应率为  $80\ \text{kV/W}$ ,等效噪声功率 NEP 为  $300\ \text{pW/Hz}^{1/2}$ 。阵列中的像元采用 NMOS 耦合差分片上贴片天线的结构,其中,为了防止制作过程中等离子体感应电压损坏 NMOS 管,

在差分天线和电路接地点间增加了静电保护二极管。2012 年, 该课题组基于 65 nm CMOS 工艺研制了工作于 0.7 THz~1.1 THz 的焦平面阵列芯片<sup>[17,18]</sup>, 如图 5 (b) 和图 5 (c) 所示。该阵列的规模为 32×32 (1 K), 像元间距为 80 μm×80 μm, 其典型响应率为 140 kV/W@856 GHz (含 5 dB 中频放大器), NEP 为 12 nW/Hz<sup>1/2</sup>。该芯片通过与高阻硅介质集成透镜集成实现了太赫兹相机, 其尺寸为 5 cm×5 cm×3 cm, 视频帧率为 500 fps。

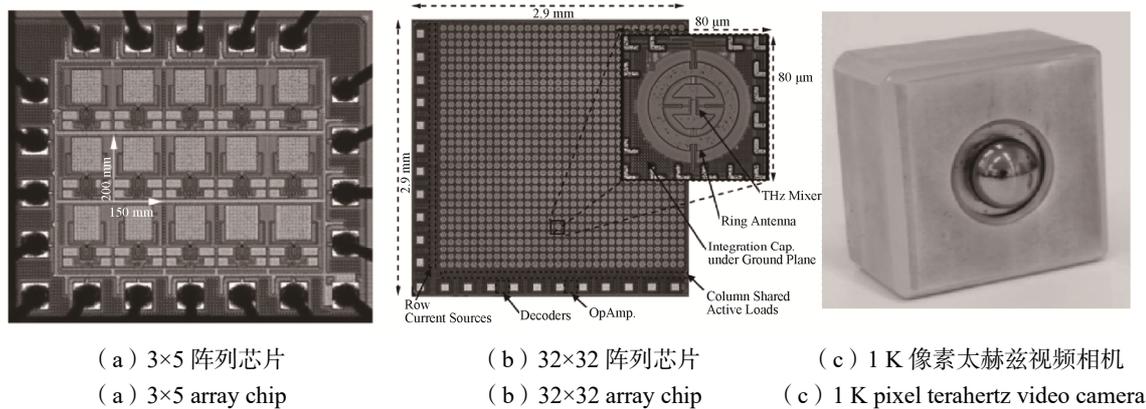


图 5 德国伍伯塔尔大学研制的太赫兹焦平面阵列芯片和相机

Fig. 5 Terahertz focal plane array chip and camera developed by the University of Wubertal in Germany

2013 年, 美国俄亥俄州立大学 Georgios C T 等人基于 GaAs 异质结反向二极管 (HBD) 研制出 0.6 THz~1.2 THz 太赫兹焦平面阵列芯片和太赫兹照相机<sup>[19]</sup>, 如图 6 所示。该阵列芯片规模为 80×60, 像元尺寸为 85 μm~92 μm, 其最高响应率为 600 V/W@700 GHz, NEP 为 163 pW/Hz<sup>1/2</sup>。该芯片通过与高阻硅介质集成透镜集成实现了太赫兹相机, 其视频帧率为 25 Hz。为了避免天线在宽带范围出现波束分裂, 采用了宽带双槽偶极子天线的形式; 为了提升太赫兹像元的电压响应率, 设计中优化了天线输入阻抗与 HBD 小信号阻抗以实现共轭匹配。

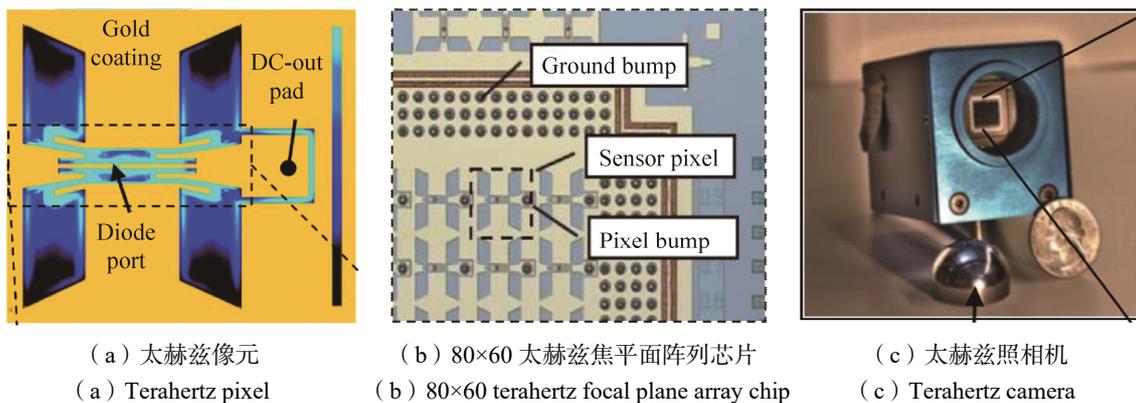


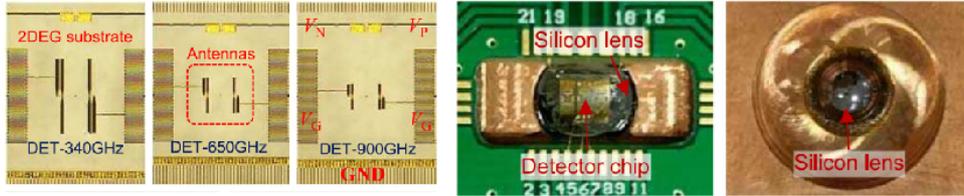
图 6 美国俄亥俄州立大学研制的太赫兹焦平面阵列芯片和太赫兹照相机

Fig. 6 Terahertz focal plane array chip and terahertz camera developed by Ohio State University

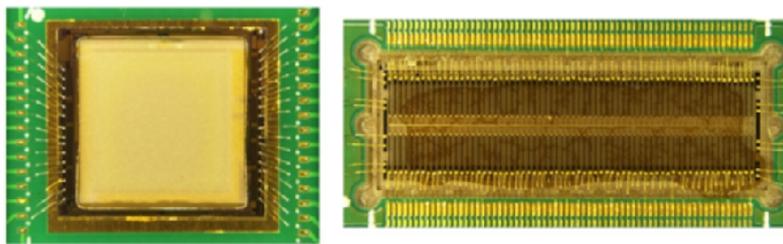
2013 年, 韩国太赫兹光子学创新研究中心 Sang-Pi Han 等人研制出 250 GHz 一维线型焦平面阵列<sup>[20]</sup>, 如图 7 (a) 所示。该阵列规模为 1×20, 像元间距为 0.5 mm, 平均电压响应率为 98.5 V/W@250 GHz, NEP 为 106.6 pW/Hz<sup>1/2</sup>。该阵列的核心器件为 InGaAs/InP 太赫兹肖特基二极管。为了提高焦平面阵列芯片的一致性和成品率, 该设计利用氮化硅 (SiN<sub>x</sub>) 填充了传统太赫兹肖特基二极管阳极和阴极之间的空气桥沟道<sup>[21]</sup>, 如图 7 (c) 所示。2014 年, 该团队基于上述技术途径研制出 200 GHz、1×240 一维线型焦平面阵列<sup>[22]</sup>, 如图 7 (d) 所示。该阵列由 6 组 1×40 子阵列芯片构成, 总长度为 12 cm, 像元间距为 0.5 mm。该阵列芯片采用倒装键合工艺实现芯片与芯片载板间集成。



用了折叠型高阻抗线作为中频引线, 实现了高集成度低频滤波功能。2020 年, 该团队基于上述像元架构, 研制出 220 GHz 太赫兹线型焦平面阵列<sup>[25]</sup>, 如图 10 (f) 所示, 该阵列规模为 1×16, 像元间距为 4 mm。该设计采用了 3D 打印微透镜阵列集成方法提高了片上天线的方向性<sup>[26]</sup>。



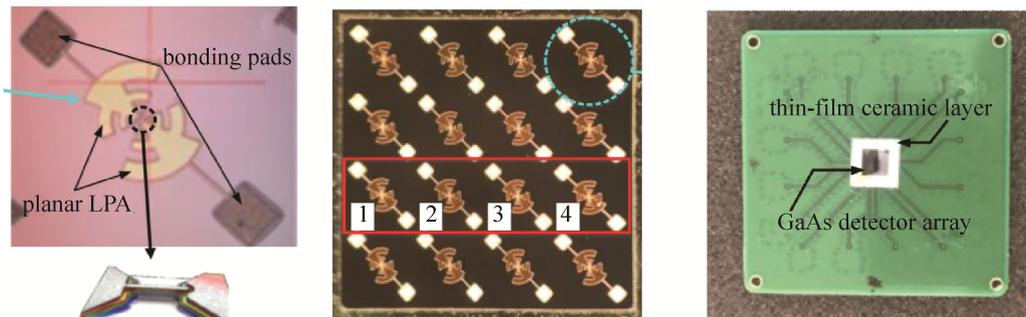
(a) AlGaIn/GaN-HEMTs 太赫兹探测器  
(a) AlGaIn/GaN-HEMTs terahertz detector



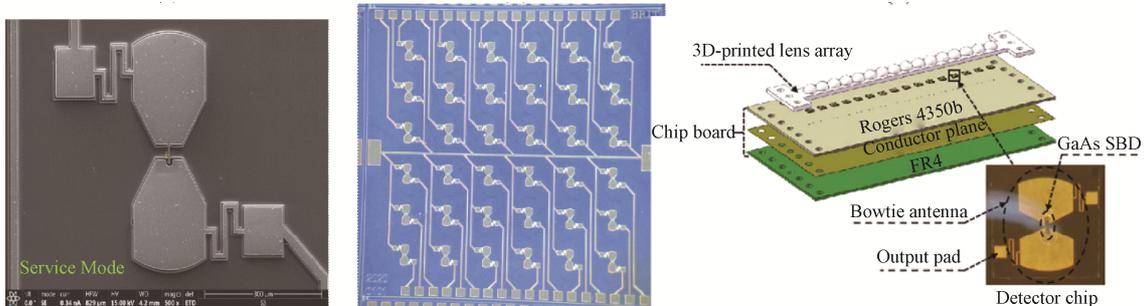
(b) 32×32 太赫兹焦平面芯片 (b) 32×32 terahertz focal plane array chip  
(c) 1×64 太赫兹焦平面阵列芯片 (c) 1×64 terahertz focal plane array chip

图 9 中科院苏州纳米所研制的太赫兹焦平面阵列芯片

Fig. 9 Terahertz focal plane array chip developed by Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics of Chinese Academy of Sciences



(a) 340 GHz 太赫兹像元 (a) 340 GHz terahertz pixel  
(b) 340 GHz 4×4 太赫兹焦平面阵列 (b) 340 GHz 4×4 terahertz focal plane array  
(c) 340 GHz 4×4 芯片载板 (c) 340 GHz 4×4 chip on board



(d) 220 GHz 太赫兹像元 (d) 220 GHz terahertz pixel  
(e) 220 GHz 6×6 太赫兹焦平面阵列芯片 (e) 220 GHz 6×6 terahertz focal plane array chip  
(f) 220 GHz 1×16 太赫兹焦平面阵列 (f) 220 GHz 1×16 terahertz focal plane array

图 10 北京遥测技术研究所研制的太赫兹焦平面阵列芯片

Fig. 10 Terahertz focal plane array chip developed by Beijing Research Institute of Telemetry

表2从工艺器件、工作频率、阵列规模、像元尺寸、电压响应率、NEP等方面对上述典型的检波式太赫兹焦平面阵列芯片和前端进行总结和对比。可以看出,应用于太赫兹焦平面阵列的典型非线性器件包括太赫兹肖特基二极管、异质结反向二极管、NMOS晶体管、HEMT晶体管等。其中,基于III-V族化合物半导体的太赫兹肖特基二极管具有最优的本征响应率和NEP,即能够在不加载中频放大器的条件下获得最优响应率和NEP。

表2 检波式太赫兹焦平面阵列研究现状

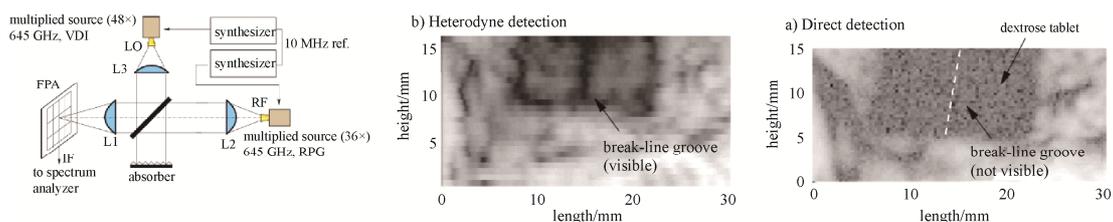
文献	工艺器件	工作频率	阵列规模	像元尺寸	电压响应率	NEP
[17]	CMOS NMOS	856 GHz	32×32	~0.25 $\lambda$	140 kV/W (含中频放大器)	12 nW/Hz <sup>1/2</sup>
[19]	GaAs HBD	320 GHz	80×60	~0.1 $\lambda$	600 V/W	163 pW/Hz <sup>1/2</sup>
[22]	InGaAs SBD	240 GHz	1×240	~0.4 $\lambda$	98. V/W	106.6 pW/Hz <sup>1/2</sup>
[9]	CMOS SBD	218 GHz	6×6	~0.5 $\lambda$	1.97 kV/W (含中频放大器)	30 pW/Hz <sup>1/2</sup>
[23]	AlGaN/GaN HEMT	340 GHz	32×32/1×16	~0.06 $\lambda$	—	30 pW/Hz <sup>1/2</sup>
[24]	GaAs SBD	340 GHz	4×4	~1.1 $\lambda$	1347 V/W	2.1 pW/Hz <sup>1/2</sup>
[25]	GaAs SBD	220 GHz	6×6	~0.7 $\lambda$	1650 V/W	3.6 pW/Hz <sup>1/2</sup>

### 3 混频式太赫兹焦平面阵列

在混频式太赫兹焦平面阵列方面开展研发工作的团队主要包括美国喷气动力实验室(JPL)、德国伍伯塔尔大学、美国麻省理工学院、北京遥测技术研究所等。

2009年,德国伍伯塔尔大学 Ullrich R. Pfeiffer 等人在前期研制的 650 GHz 太赫兹焦平面阵列芯片基础上开展了混频成像实验<sup>[27]</sup>。该阵列芯片规模为 3×5,本振信号通过波束分离器实现了空间馈电,如图 11(a)所示。每个像元在本振驱动功率为-32.5 dBm 条件下的典型单边带噪声系数约为 68 dB~70 dB。此外,该团队对检波和混频两种工作模式的成像质量进行了对比,成像结果如图 11(b)和图 11(c)所示。结果表明,混频模式下的成像质量明显优于直接检波体制。2015年,该课题组基于 0.25  $\mu\text{m}$  SiGe HBT BiCMOS 工艺研制出 160 GHz~1 THz 焦平面阵列<sup>[28]</sup>,如图 11(d)~图 11(f)所示。该阵列芯片规模为 2×2,像元间距为 150  $\mu\text{m}$ 。该阵列的变频损耗为 21.2 dB@650 GHz、18 dB@820 GHz、22.8 GHz@995 GHz。该阵列芯片为谐波混频器耦合差分环形天线形式,与发射源配合,可工作在奇次谐波模式和偶次谐波模式,从而实现 6 个频段工作。其中,该芯片利用环形天线的端口差分馈线可以实现本振馈电。

2010年,美国喷气动力实验室 Ken B.C 等人研制了一套工作于 680 GHz 的单通道前端<sup>[29]</sup>,如图 12(a)所示。该前端采用金属波导腔体集成架构,很难形成高密度高集成度阵列。为了提高收发阵列密度,该研究团队又于 2015年采用深硅刻蚀工艺研制出 340 GHz 阵列<sup>[30]</sup>,如图 12(b)和图 12(c)所示。为了提高像元集成度,该设计采用垂直堆栈式架构。该前端阵列规模为 1×8,采用 4 个 1×2 子阵列拼接成,像元间距为 12 mm,本振采用路馈式。各通道典型变频损耗约 8 dB,双边带噪声温度为 2000 K。



(a) 基于 3×5 阵列的本振空馈混频式成像系统

(a) Mixing mode imaging system based on 3×5 array with Lo quasi-optical feed

(b) 混频式成像结果

(b) Mixing mode imaging

(c) 检波式成像结果

(c) Directly-detection imaging

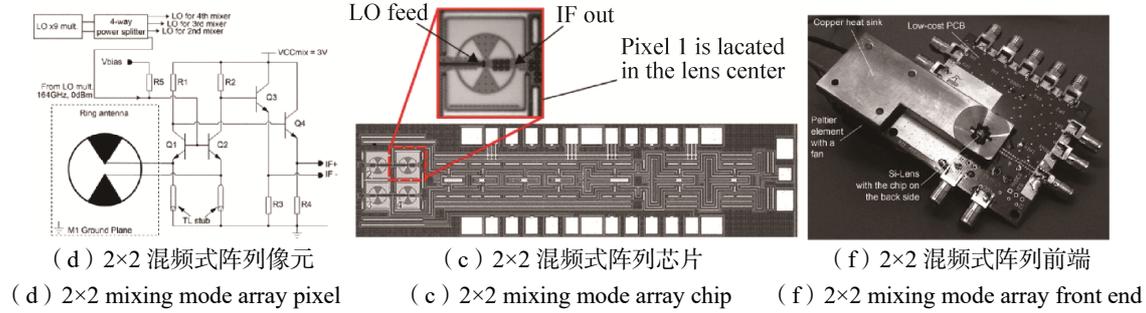


图 11 德国伍伯塔尔大学开展的混频成像实验

Fig. 11 The experiment of mixed frequency imaging carried out by the University of Wubertal in Germany

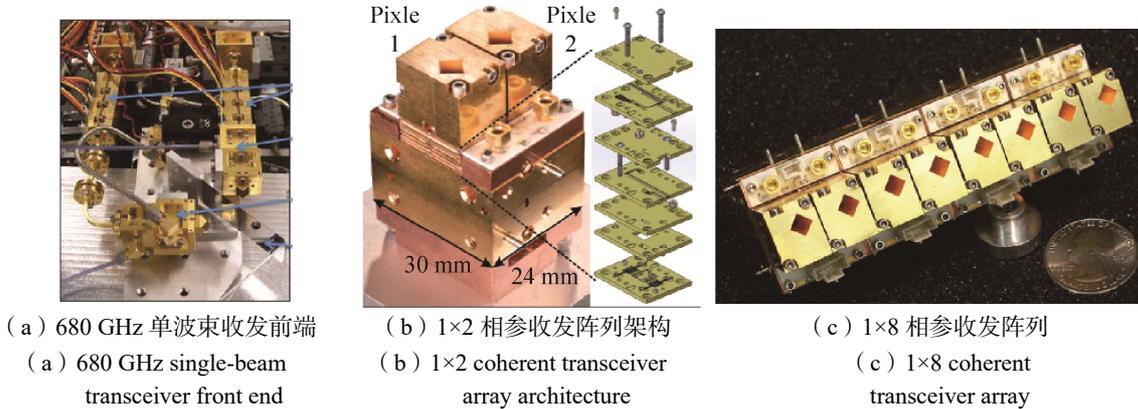


图 12 美国喷气动力实验室研制的 680 GHz 单通道前端

Fig. 12 680 GHz single channel front end developed by American Jet Power Laboratory

2014 年,北京理工大学吕昕课题组基于 GaAs 肖特基二极管工艺研制出 340 GHz 太赫兹焦平面阵列芯片<sup>[31]</sup>,如图 13 (a) 所示。该芯片阵列规模为 1×4,像元间距为 1 mm,采用高阻硅介质透镜集成和波束分离器空间馈电途径研制混频式太赫兹焦平面阵列,各像元典型变频损耗为 18 dB。

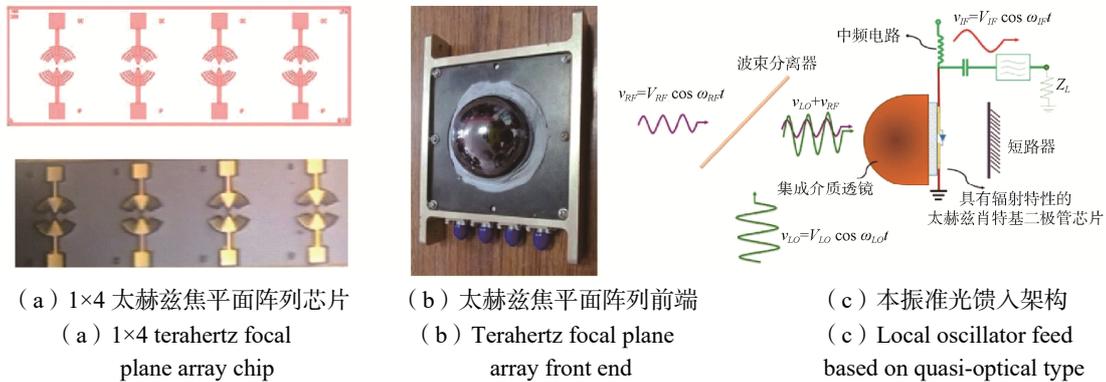


图 13 北京理工大学研制的太赫兹焦平面阵列芯片

Fig. 13 Terahertz focal plane array chip developed by Beijing Institute of Technology

2016 年,美国康奈尔大学 Chen Jiang 等人基于 130 nm SiGe BiCMOS 工艺研制出 320 GHz 全单片集成太赫兹相参接收阵列芯片<sup>[8]</sup>,如图 14 所示。该相参阵列像元为双极晶体管耦合贴片天线形式,工作在亚谐波模式,本振采用微带线传输实现馈入。该接收阵列芯片包含 8 个单元,芯片尺寸为 1.7×1.8 mm<sup>2</sup>,在加载 60 dB 中频放大器条件下,其响应率优于 7.26 MV/W,灵敏度为 70.1 pW@1 kHz 带宽,变频增益为 29.8 dB。其中,为了解决本振信号自混频问题,该相参阵列像元采用差分形式。为了实现等幅相的本振功分网络,该设计采用了高度旋转对称的本振功分网络,仿真得出 8 个输出端口间本振功率差在 0.15 dB 范围内,相位相差约 5°。

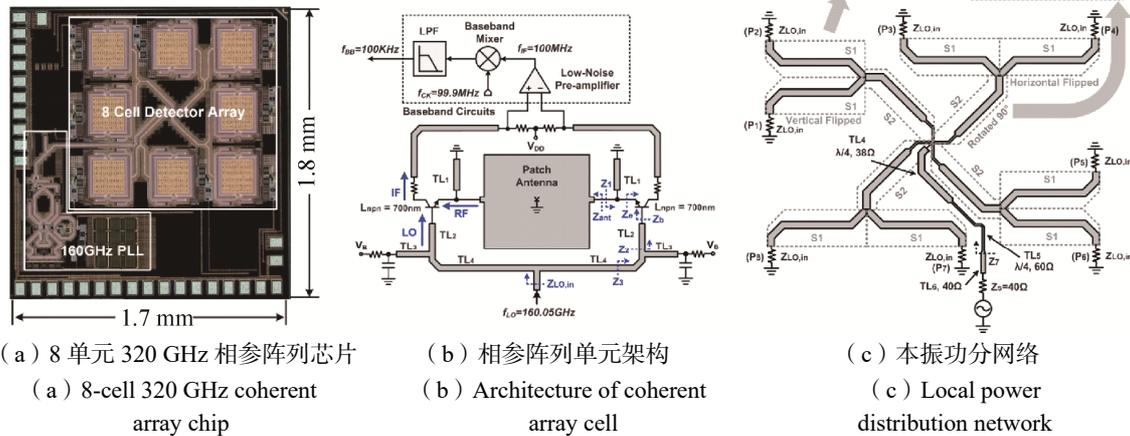


图 14 美国康奈尔大学研制的太赫兹相参接收阵列芯片

Fig. 14 Terahertz coherent receiving array chip developed by USA's Cornell University

2018年,美国麻省理工学院 Zhi Hu 等人基于 65 nm CMOS 工艺研制出工作于 240 GHz 的相参焦平面阵列芯片<sup>[10]</sup>,如图 15 所示。该芯片的阵列规模为 4×8,像元间距为  $\lambda/2 \times \lambda/2$ ,尺寸为 1.1 mm×1.4 mm,典型变频损耗为 39.8 dB,灵敏度为 0.058 pW@1 kHz。该芯片中的每个像元都由一个本振源独立馈电,并有三方面亮点。第一,该设计采用 CPW 线耦合实现了相邻本振源的强耦合,提高了各个本振信号的相干性。第二,为了实现本振源和射频源相参,该设计将分频器提取的振荡频率送入到鉴频鉴相器,进而反馈到本振振荡器的调谐端构成 PLL,然后各像元本振信号通过低频参考时钟与射频源信号相参。第三,该设计采用了半球型高阻硅介质透镜改善了各像元片上天线的方向性。

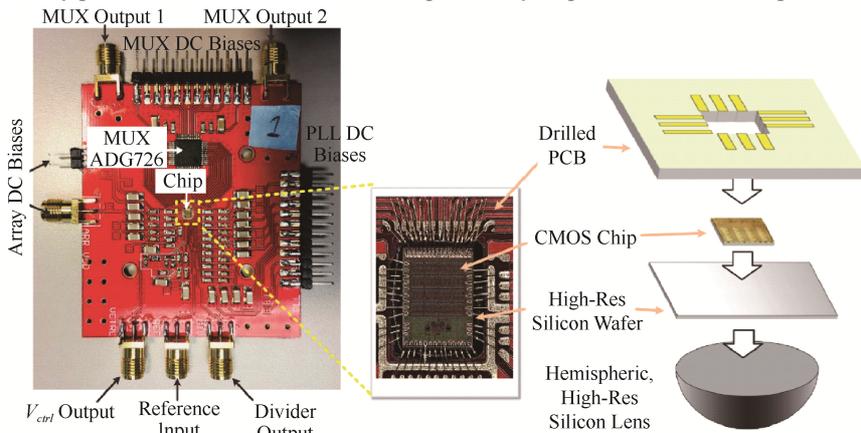
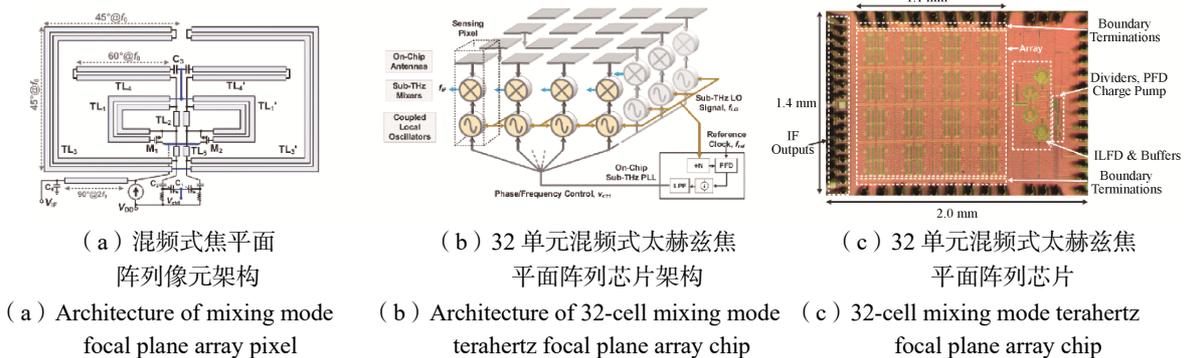


图 15 美国麻省理工学院研制的太赫兹相参接收阵列芯片

Fig. 15 Terahertz coherent receiving array chip developed by USA's Massachusetts Institute of Technology

2020 年, 日本国家天文台单文磊等人研制出基于双极化平衡超导-绝缘-超导结 (SIS) 的 125 GHz~163 GHz 混频式焦平面阵列<sup>[32,33]</sup>, 如图 16 所示。该阵列需要工作于 4 K 低温测试环境, 其规模为 2×2, 像元间距约 35 mm, 变频损耗低于 4.5 dB。该设计采用了紧凑型混合平面集成 (HPI) 方案提升了阵列集成度。此外, 本振信号采用波导功分器实现了本振信号功率分配并采用通过硅薄膜探针电磁耦合途径实现了像元的本振信号馈入。

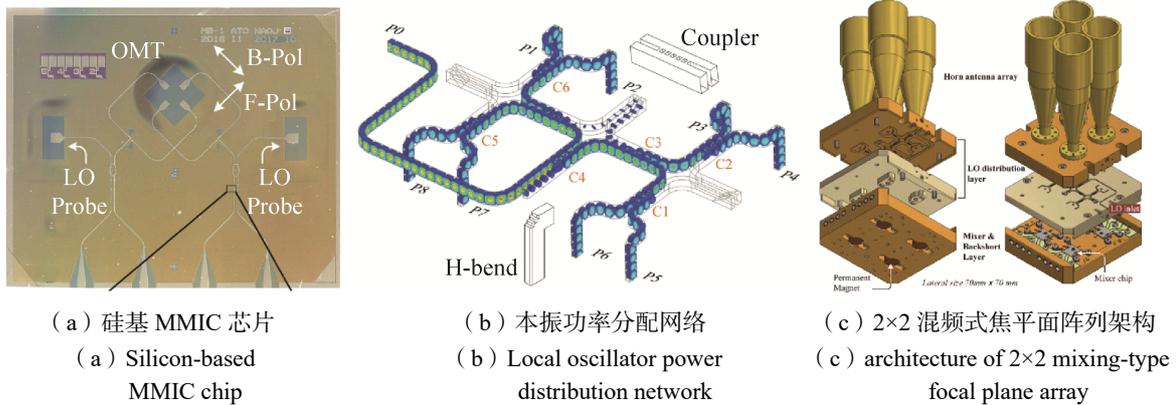


图 16 日本国家天文台研发的混频式焦平面阵列架构

Fig. 16 Mixing-type focal plane array developed by National astronomical observatory of Japan

表 3 从技术途径、工作频率、阵列规模、本振馈电方式、像元尺寸、变频损耗、灵敏度这七个方面对上述典型的太赫兹混频式焦平面阵列进行总结和对比。可以看出, 本振馈电网络可以分为路馈和空馈两种方案。其中, 路馈方案又包含平面传输线功分和波导传输线功分这两种途径; 空馈方案主要采用分束器途径。

表 3 太赫兹混频式焦平面阵列研究现状

Table 3 Research status of mixing mode terahertz focal plane array

文献	技术途径	工作频率	阵列规模	本振馈电方式	像元尺寸	变频损耗	灵敏度 (1 kHz 带宽)
[27]	0.25 μm CMOS NMOS	650 GHz	3×5	高阻硅片分束器	0.5 λ	~68 dB	—
[30]	MEMS	340 GHz	1×8	波导一分二功分	13 λ	8 dB	—
[31]	GaAs	340 GHz	1×4	高阻硅片分束器	1.6 λ	18 dB	—
[8]	130 nm SiGe BiCMOS	320 GHz	8 单元	微带线第一级一分四功分, 第二级一分二功分	2 λ	~30 dB	70.1 pW
[10]	65 nm CMOS	240 GHz	4×8	槽线 32 路 VCO	0.5 λ	39.8 dB	0.058 pW
[32]	MMIC+CNC	144 GHz	2×2	波导 2 阶 1 分 2	~17 λ	4.5 dB~0*	—

\*低温超导 SIS 工作在 4 K 环境下

#### 4 关键技术及发展趋势

##### ① 高集成度大规模太赫兹焦平面阵列架构

随着太赫兹焦平面成像系统向着更高分辨率、更宽或更灵活视场、更好实时性方向发展, 高集成度大规模太赫兹焦平面阵列芯片及前端作为其关键技术, 也是未来发展趋势之一。将检波天线架构应用于像素级太赫兹探测器满足了太赫兹焦平面阵列向着更高密度、更大阵列规模发展的基本需求<sup>[12]</sup>。但是, 对于混频式阵列来说, 本振馈电网络和中频滤波网络仍然是高密度大规模阵列必须解决的关键技术: 一

是阵列规模易扩展的低剖面本振高效馈电网络技术,包括有限空间约束下的太赫兹信号功率分配器和本振信号高效率耦合机理两方面研究,实现高幅相一致性、高隔离度、高集成度的本振功分网络;二是电小尺寸中频滤波开关网络技术,重点涉及滤波开关一体化融合设计<sup>[34]</sup>。

### ② 高灵敏度像素级太赫兹探测器

虽然基于检波天线架构的像素级太赫兹探测器既可以工作于检波模式也可以工作于混频模式<sup>[35]</sup>,但是对于如何同时在两种模式下获得最佳响应的理论和技术尚未开展系统性研究,亟待解决如下问题:一是多指标约束下的检波天线优化设计理论,即在检波模式响应率最优和混频模式变频损耗最优双重目标下,对检波天线中的天线、非线性器件、中频电路开展综合优化设计;二是跨层级多参数关联的检波天线建模技术,即建立检波天线的物理全波模型,并将芯片材料参数和器件关键结构几何参数等基础变量参数化,支撑检波天线的综合优化设计;三是低偏置或本振功率状态下的高灵敏度检波天线技术,即在有限直流偏置条件下实现最优响应率或在低本振功率条件下实现最优变频损耗,这对于大规模阵列来说十分重要。

### ③ 太赫兹焦平面阵列盲元检测与不一致性校正

由于半导体工艺、集成装配、主口径偏焦效应、长期使用中损耗等因素的存在必然会导致太赫兹焦平面阵列中存在盲元或者各像元之间性能不一致,进而影响成像性能。因此,实现太赫兹焦平面阵列盲元检测与非均匀性自动校正是提升系统鲁棒性和图像质量的重要研究之一,亟须解决以下关键问题:一是盲元检测与自适应补偿,尤其是在应用过程中引入自动检测与补偿机制保证焦平面阵列的稳定性;二是阵列幅相不一致性校正,重点解决阵列芯片自身存在的固定不一致性、本振馈电网络引入的固定不一致性、主口径偏焦效应引入的固定不一致性以及长期使用中损耗导致的随机不一致性,实现阵列各像元输出信号幅相补偿。

## 5 结束语

太赫兹焦平面阵列成像具有成像帧率快、凝视前视、实孔径成像的特点,在深空探测与遥感、目标感知与攻防、无损探伤与隐匿目标成像等方面具有广泛的应用前景。本文从太赫兹焦平面成像系统基本原理和阵列典型架构出发,重点介绍了基于检波天线架构的像素级太赫兹探测器的概念。然后,分别介绍了检波式和混频式太赫兹焦平面阵列的发展情况。最后,从系统、器件和软件三个角度梳理了太赫兹焦平面阵列关键技术和发展趋势。

## 参考文献

- [1] 牟进超, 乔海东, 刘娣, 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.  
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.
- [2] 牟进超, 孙兆阳, 刘昊. 面向天空应用的太赫兹波实时态势感知与监视探测技术[C]//第三届航天电子战略研究论坛论文集, 2017, 61: 54–58.  
MOU Jinchao, SUN Zhaoyang, LIU Hao. Terahertz wave real-time situational awareness and surveillance detection technology for space and sky applications[C]//Proceedings of the 3rd Aerospace Electronic Strategy Forum, 2017, 61: 54–58.
- [3] FEDERICI J F, SCHULKIN B, HUANG F, et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs[J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(7): S266–S280.
- [4] GAVDUSH A A, CHERNOMYRDIN N V, MALAKHOV K M, et al. Terahertz spectroscopy of gelatin-embedded human brain gliomas of different grades: A road toward intraoperative THz diagnosis[J]. Journal of Biomedical Optics, 2019, 24(2): 027001.
- [5] COOPER K B, DENGLER R J, LLOMBART N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 169–182.

- [6] ZHONG S. Progress in terahertz nondestructive testing: A review[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2019: 1–9.
- [7] FILIPPIDIS G, MASSAOUTI M, SELIMIS A, et al. Nonlinear imaging and THz diagnostic tools in the service of cultural heritage[J]. *Applied Physics A*, 2012, 106(2): 257–263.
- [8] JIANG C, 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.
- [9] FLEET E F, ROMERO H, SCHLUPF J, et al. Design and performance of a THz block camera with a 130 nm CMOS focal plane array[C]//*Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XX*. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10189: 101890A.
- [10] 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.
- [11] GRAF U U, HONINGH C E, JACOBS K, et al. Terahertz heterodyne array receivers for astronomy[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(10): 896–921.
- [12] 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.
- [13] MOU J, GUO D, XUE Q, et al. THz mixtenna chips and quasi-optical mixers for focal plane imaging applications[C]//2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE, 2015: 1–1.
- [14] MOU J, SHEN Z, GUO D, et al. Compact and wideband millimeter-wave antenna-coupled detector[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 66(2): 1058–1069.
- [15] QIAO H, LIU H, MOU J, et al. Compact terahertz detector based on lightweight 3D-printed lens packaging[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(14): 796–797.
- [16] OJEFORS E, PFEIFFER U R, LISAKAS 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.
- [17] AL HADI R, 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.
- [18] GRZYB J, SHERRY H, ZHAO Y, et al. Real-time video rate imaging with a 1 k-pixel THz CMOS focal plane array[C]//*Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XV*, 2012: 83620C.
- [19] 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 and Propagation*, 2013, 61(4): 1733–1740.
- [20] 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, 21(22): 25874–25882.
- [21] MOU J, YUAN Y, LV X, et al. Design and fabrication of planar GaAs Schottky barrier diodes for submillimeter-wave applications[C]//2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. IEEE, 2010: 1746–1749.
- [22] HAN S P, KO H, KIM N, et al. Real-time continuous-wave terahertz line scanner based on a compact×240 InGaAs Schottky barrier diode array detector[J]. *Optics express*, 2014, 22(23): 28977–28983.
- [23] QIN H, LI X, SUN J, et al. Detection of incoherent terahertz light using antenna-coupled high-electron-mobility field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(17): 171109.
- [24] LI M, LV X, MOU J, et al. 340 GHz lens-coupled 4×4 GaAs detector array for terahertz imaging applications[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(20): 1180–1182.
- [25] QIAO H D, LIU H, MOU J C, et al. 220 GHz focal plane imaging demonstration using integrated terahertz array detector[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(9): 2826–2829.
- [26] QIAO H D, LIU H, MOU J C, et al. A compact W-band quasi-optical detector packaged by meta-surface reflector and 3D-printed lens[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(2): 750–755.
- [27] PFEIFFER U R, OJEFORS E, LISAKAS A, et al. A CMOS focal-plane array for heterodyne terahertz imaging[C]//2009 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. IEEE, 2009: 433–436.
- [28] STATNIKOV K, GRZYB J, HEINEMANN B, et al. 160 GHz to 1 THz multi-color active imaging with a lens-coupled SiGe HBT chip-set[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63(2): 520–532.
- [29] RECK T, SILES J, JUNG C, et al. Array technology for terahertz imaging[C]//*Passive and Active Millimeter-Wave Imaging*

- XV. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8362: 836202.
- [30] RECK T, JUNG-KUBIAK C, SILES J V, et al. A silicon micromachined eight-pixel transceiver array for submillimeter-wave radar[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(2): 197–206.
- [31] 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.
- [32] SHAN W, EZAKI S, KANG H, et al. A compact superconducting heterodyne focal plane array implemented with HPI (Hybrid Planar Integration) scheme[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020, 10(6): 677–689.
- [33] SHAN W, EZAKI S, KANEKO K, et al. Experimental study of a planar-integrated dual-polarization balanced SIS mixer[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2019, 9(6): 549–556.
- [34] LI Y C, FANG X, XUE Q, et al. Dual-mode filtering switches based on hybrid microstrip-cavity structures[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(8): 3853–3860.
- [35] LI M, MOU J, GUO D, QIAO H, et al. Design and imaging demonstrations of a terahertz quasi-optical Schottky diode detector[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(6): 717–722.

#### [作者简介]

- 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。
- 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。
- 刘 娣 1994年生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为太赫兹天馈馈与源技术。
- 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。

(本文编辑: 傅 杰)