

〈综述与评论〉

THz 焦平面探测器及其成像技术发展综述

金伟其¹, 田 莉¹, 王宏臣², 蔡 毅¹, 王 鹏²

(1.北京理工大学光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;
2.烟台睿创微纳技术有限公司, 山东 烟台 26400)

摘要: THz 探测器作为 THz 成像系统的核心器件, 一定程度上制约着 THz 成像技术的发展, 鉴于单元/多元探测器的光机扫描成像模式存在的问题, THz 焦平面探测器成像成为 THz 探测技术发展的方向。介绍了近年来国内外在 THz 焦平面探测器, 特别是基于 VO_x 的 THz 焦平面探测器及其成像技术的研究进展, 分析了 THz 焦平面探测器及其成像模式的发展前景。本文对于研究 THz 成像技术及应用的发展具有重要的参考意义。

关键词: THz 成像; THz 探测器; 焦平面; VO_x 非制冷探测器; 热释电非制冷探测器

中图分类号: TN224 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)04-0187-08

Review of THz Focal Plane Detector and the Development of Its Imaging Technology

JIN Wei-qi¹, TIAN Li¹, WANG Hong-chen², CAI Yi¹, WANG Peng²

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System,
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081, China
2. Yantai Raytron Technology Co., Ltd, Yantai 264000, China)

Abstract: As the core device of the THz imaging system, the development of THz detectors restricts the development of THz imaging technology. Because there are many problems in the unit/multiple-detector optical mechanical scanning imaging mode, THz focal plane array (FPA) detector imaging becomes the development direction of the THz detection technology. This article describes the research advances of the THz focal plane array detectors especially the THz focal plane array detector which based on the VO_x uncooled FPA and its imaging technology both at home and abroad in recent years. This paper also analyzes the development prospects of the THz focal plane detector and its imaging mode, the paper has reference significance to the research of the development and application of THz imaging technology.

Key words: THz imaging, THz detector, focal plane array(FPA), VO_x uncooled detector, Pyro-electric uncooled detector

0 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指频率在 0.1~10 THz (波长为 30 μm ~3 mm) 之间的电磁波, 处于毫米波(通常为 1~10 mm)与红外波(通常为 1~20 μm)之间, 即通常所认为的电子学和光学的交界区域。近年来, 由于太赫兹波具有瞬态性、宽带性、高时间和空间相干性、低能性以及独特的传输

特性等特点, 使其在安全检测、波谱分析、成像与通信、化学、生物、材料科学和药学等领域展现出广泛的应用前景, 成为国内外研究的重要方向之一。

THz 技术主要有波谱和成像两种应用模式^[1], 根据 THz 辐射特性又可分为连续 THz 辐射和脉冲 THz 辐射, 其不同的组合具有相应的特点, 适合于不同的应用条件。通常 THz 传感和成像系统主要包括 THz 辐射源、THz 传感器以及相关的辅助部件(光

学系统、调制器等)。作为 THz 成像探测的核心器件, THz 探测器的发展是制约 THz 技术发展的重要因素。

常见的 THz 探测器类型主要是液氦制冷的 Si、Ge 和 InSb 测辐射热计 (Bolometer)、高莱探测器 (Golay Cell)、热释电 (Pyroelectric)、肖特基二极管、场效应晶体管等单元或多元探测器, 其只能采用扫描成像模式^[2-4], 成像周期较长, 成像分辨率较低, 两者相互矛盾, 往往难以满足实际应用对高分辨率成像的需要。因此, 高灵敏度、高分辨率的 THz 成像传感器成为国内外 THz 技术研究发展的重要内容之一。

随着探测器工艺和信号处理技术的发展, 单元/多元探测器+光机扫描成像模式向(扫描或凝视)焦平面探测器成像模式的发展是国内外光电成像技术发展的必然趋势。近 20 年来红外焦平面探测器技术的发展带来了红外热成像技术领域的飞速发展, 特别是非制冷焦平面探测器技术的发展, 更拓展了热成像技术的应用领域。目前较成熟的非制冷红外焦平面探测器主要有热释电和微测辐射热计 (Micro-Bolometer) 两大类, 其属于热探测器, 理论上在更广阔的电磁波段均具有响应。实际上, 近年来国内外研究机构已在红外探测器的基础上, 进行 THz 焦平面探测器及其成像方法的研究, 并取得了一定的成像效果。本文将综述 THz 焦平面探测器技术的研究进展, 分析 THz 焦平面探测器技术的发展前景。

1 热释电非制冷 THz 焦平面探测器及其成像系统

热释电探测器是一种基于热释电效应的热电探

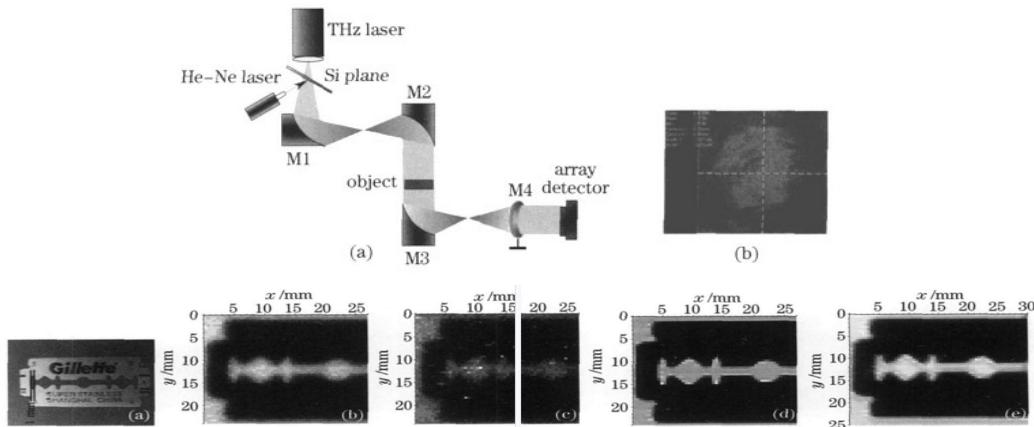


图 2 哈工大的 THz 连续波成像系统示意图及其成像实验

Fig.2 THz CW imaging system sketch and its imaging experiment of HIT

测器, 热释电红外焦平面探测器价格较低, 成像均匀性好, 但一般需要调制且灵敏度稍低。近几年来, 国内外已有一些基于热释电红外非制冷焦平面探测器进行 THz 成像系统的研究, 典型的研究如:

2008 年国内深圳大学杨珺等采用 OPHIROPT 公司热释电非制冷焦平面探测器成像仪 Pyrocam III (如图 1), 热释电 (LiTaO_3) 非制冷焦平面热像仪, 像素数 124×124 , 像元间距 $100 \mu\text{m}$, 单元尺寸 $85 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$, 传感器面尺寸 $12.4 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$, 斩波调制频率 48 Hz , 工作波长为 $13 \sim 355 \text{ nm}$ 的紫外波段及 $1.06 \sim 3000 \mu\text{m}$ 的红外波段, NEP 为 2.2 W/cm^2 (@24 Hz) 实现了 1.89 THz 面阵透射成像^[5-6], 将人民币水印、螺母等目标直接放置在 THz 辐射源后, 透射光经过聚乙烯透镜聚焦后进入探测器成像。



图 1 Pyrocam III 热像仪

Fig.1 Pyrocam III thermal imager

同年哈尔滨工业大学采用 Pyrocam III 热像仪与美国相干公司 SIFIR 50 CO_2 连续 THz 激光器结合, 搭建了 THz 连续波成像系统 (如图 2), 实现了 1.63 THz , 2.45 THz 和 2.52 THz 的成像^[7-9], 系统结构紧凑, 输出较稳定, 功率较高, 且易于操作, 系统分辨率达到 0.6 mm 。并于 2010 年对连续 THz 波成像分辨率的影响因素进行了理论分析及模拟。

2 基于 VO_x 的 THz 焦平面探测器及其成像系统

微测辐射热计焦平面探测器主要有美国的 VO_x 和法国的多晶硅两大类, 一般认为 VO_x 较多晶硅焦平面探测器具有更高的灵敏度, 因此, 目前 THz 波段的研究均以 VO_x 焦平面探测器为主。 VO_x 焦平面探测器属于热电阻探测器, 理论上具有较宽的光谱响应范围, 但实际作为长波红外焦平面探测器应用时, 通过镀膜使其工作在长波红外波段。

由于非制冷红外焦平面探测器涉及复杂且昂贵的器件工艺, 目前仅有几家国外公司具备非制冷焦平面探测器的批量生产能力, 对其用于 THz 波段成像探测的研究机构也很少。国内近年来在基于 VO_x 的红外非制冷焦平面探测器研制和生产方面有了重大的突破, 但截止目前尚未见到关于 VO_x 非制冷焦平面探测器用于 THz 成像研究的报道。

2.1 美国 MIT

2005 年美国 MIT 的 Alan W. M. Lee 提出基于 VO_x 焦平面探测器的连续波 THz 透射成像^[10], 采用 BAE Systems 公司 SCC 500 L VO_x 焦平面探测器组

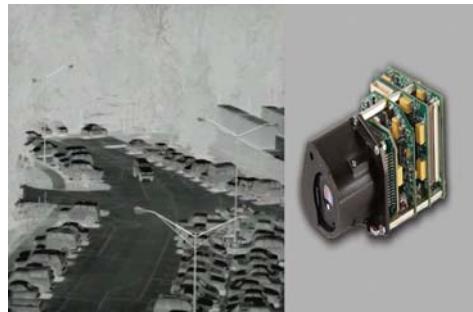


图 3 SCC 500 系列非制冷焦平面组件

Fig.3 SCC 500 Uncooled focal plane components

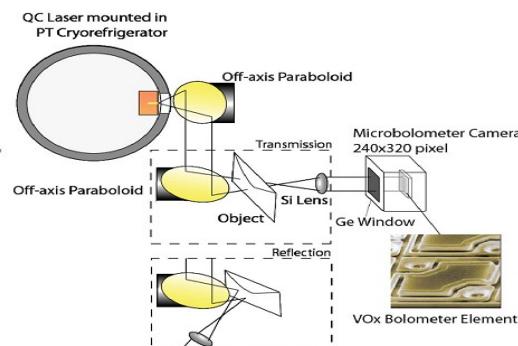


图 5 4.3 THz 连续波透射/反射焦平面成像及其成像效果

Fig.5 4.3 THz CW transmission/reflection focal plane imaging and its results

件 (如图 3, 像元数 160×120 , 像元尺寸 $46 \mu\text{m} \times 46 \mu\text{m}$, NETD($f/1.0@30\text{ Hz}$) $< 0.05^\circ\text{C}$, 帧频 60 Hz) 与 2.52 THz 的 10 mW 气体激光器, 经过高密度聚乙烯 (HDPE) 的滤波及锗透镜的聚焦作用后, 实现了 2.52 THz 连续波透射成像, 获得较为清晰的实时视频图像 (如图 4)。研究指出, 微测辐射热计在 THz 波段的灵敏度虽然不是最佳的, 但仍可直接用于 THz 波功率的探测, 并分析了系统在衍射条件下的极限分辨率达到 1.5 mm。

2006 年 Alan W. M. Lee 等进一步采用 BAE 公司 SCC 500H VO_x 焦平面探测器 (像元数 320×240 , 像元尺寸 $28 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$, NETD($f/1.0@30\text{ Hz}$) $< 0.1^\circ\text{C}$, 帧频 60 Hz) 进行 THz 焦平面成像的研究^[11], 将 VO_x 焦平面探测器放置在真空腔中, 窗口换为 Ge 窗口, 并镀制聚乙烯 (polyethylene) 增透膜以减少反射损耗。经过优化处理后的探测器与量子级联激光器 QCL 结合, 实现了信封中铅笔字及指纹的 4.3 THz 处连续波透射和反射成像 (如图 5)。同年, Alan W. M. Lee 等进一步采用该器件, 对距离超过 25 m 处的干豆荚进行透射成像^[12] (如图 6 所示)。

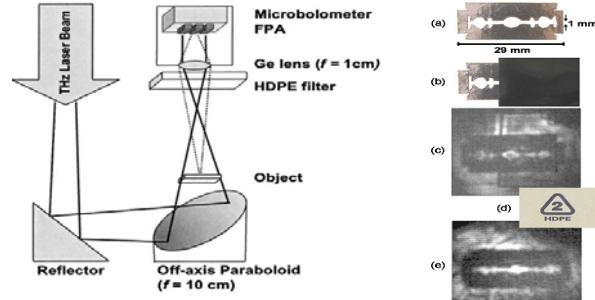


图 4 MIT 连续波 THz 透射成像系统及其图像

Fig.4 MIT CW THz transmission imaging system and images

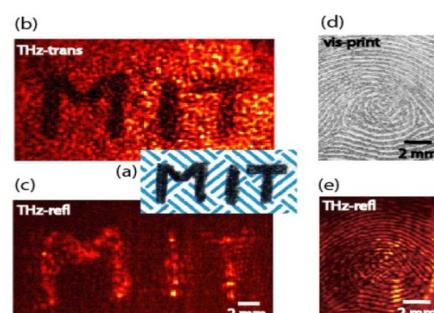


图 5 4.3 THz 连续波透射/反射焦平面成像及其成像效果

Fig.5 4.3 THz CW transmission/reflection focal plane imaging and its results

2.2 日本NEC公司

日本NEC公司是当前国际上THz焦平面探测器生产和系统研究的主要机构之一。2008年,NEC公司在 VO_x 红外焦平面探测器基础上,通过在 VO_x 焦平面探测器上增加THz吸收层、各膜层以及探测器空气间隙等的优化设计等,从像元微结构的优化设计进行 VO_x 焦平面探测器用于THz波段的研究^[13]。

2011年,NEC公司成功研制出2种基于 VO_x 的宽带和窄带型THz焦平面探测器件,其像元结构如图7所示。探测器被用于其手持式THz相机实现了对人体实时被动成像^[14](如图8,成像距离为4m)。2012年,NEC将其THz测试相机用于THz-TDS成像系统,测量THz波的光束模式^[15],该测试相机使用宽带型THz焦平面探测器(320×240,帧频60Hz,SNR3-4)。实验表明:NEC公司THz相机不仅在连续THz波成像并且在时域THz探测成像方面都有着广泛的应用。2012年NEC公司推出THz焦平面相机IRV-T0831^[16](如图9,像元尺寸320×240;NEP<100pW(@4THz),响应范

围1~7THz;帧频8.5/30Hz;信号输出:数字信号USB2.0,模拟信号BNC;锁相功能:模拟信号以及使用率12VDC,重量约600g),并与4.2THz、2.5THz、1.9THz等量子级联激光器QCL结合实现了THz焦平面成像。IRV-T0831相机2012年开始进入中国市场。

2.3 国内基于 VO_x 的THz焦平面探测器研制情况

近年来国内基于 VO_x 的非制冷焦平面探测器取得了重要的突破^[17],烟台睿创微纳技术有限公司^[18]和北京广微积电科技有限公司^[19]均已研制出 VO_x 非制冷红外焦平面探测器产品。2012年北京理工大学与烟台睿创微纳技术有限公司联合开展THz焦平面探测器的研究,设计了基于“+”天线的THz焦平面探测器(如图10,探测器规模384×288,像元尺寸35μm),2012年底首次实现了实时的THz焦平面成像(如图11,4.25THz气体激光器,对塑料箱内的刀片进行投射成像),但成像质量(灵敏度和图像均匀性等,图中条纹状固定图案噪声为探测器非均匀性造成,圆环状固定图案噪声为THz辐射源分布不均匀造成)需要进一步提高。

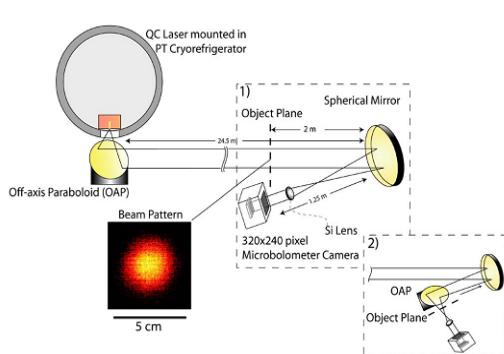


图6 4.3 THz连续波成像系统用于25m外干豆荚成像及其效果

Fig.6 4.3 THz CW imaging system is used for imaging the dried seed pod(>25 m)

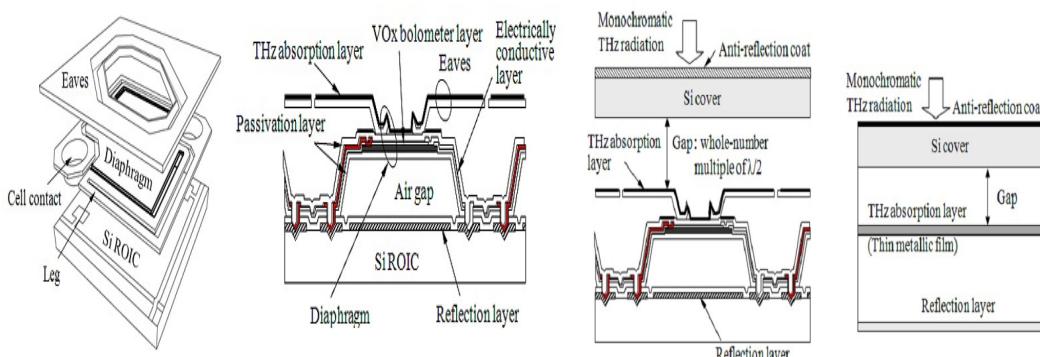
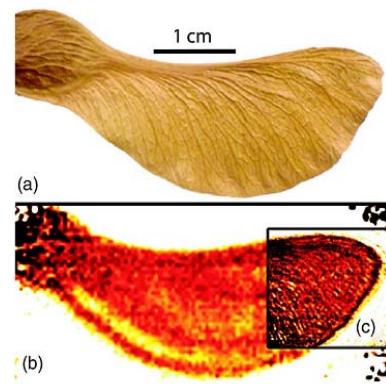


图7 宽带型及窄带型THz焦平面探测器像元结构示意图

Fig.7 Pixel structure of broad-band type and narrow-band type THz-FPA

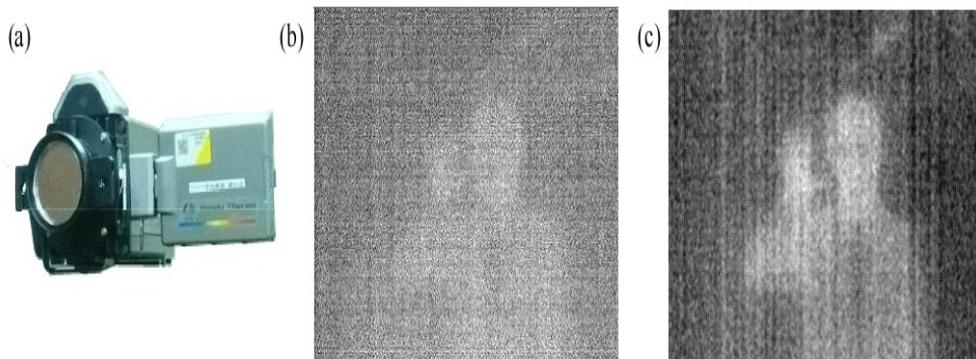


图 8 手持式 THz 相机及人体进行实时被动成像

Fig.8 Passive images of person ((a) handy camera; (b) THz image taken at frame rate of 60 Hz; (c) THz image (frame integration:64, pixel integration: 3×3))



图 9 NEC 公司 THz 焦平面相机

Fig.9 THz FPA camera of NEC

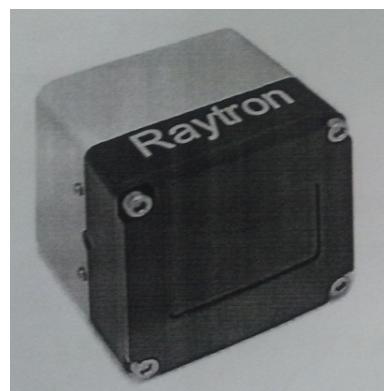


图 10 烟台睿创研制的 THz 焦平面探测器

Fig.10 THz FPA of Raytron

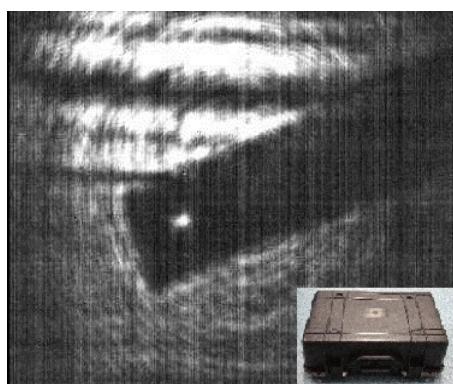


图 11 初步的 THz 焦平面成像效果

Fig.11 Initial results of the THz FPA detector

2.4 法国电子与信息技术实验室 (CEA-Leti)

2010 年法国电子与信息技术实验室对 VO_x 焦平面探测器像元结构进行优化设计^[20]。不仅增加 THz 吸收层以提高对 THz 的吸收, 而且通过天线耦合方式进一步提高探测器灵敏度, 其结构示意图如图 12 所示。

2012 年法国 CEA-Leti 研制了一种由量子级联

激光器 QCL 和 THz 焦平面相机组成的实时反射成像系统 (如图 13)^[21], 其中望远系统将反射的辐射聚焦到相机上, 相机采用 320×240 天线耦合焦平面探测器和基于 FPGA 的特殊信号处理方法, 获得了 2.5 THz 实时高分辨率图像。

3 其它类型 THz 焦平面探测器及其成像系统

2010 年法国 CEA Leti 公司 Franz Schuster 等研制成功采用 130 nm 低成本 CMOS 晶体管的 THz 成像探测器^[22], 包含 36 像元 (像元间距 250 μm) 和 63 像元 (像元间距 210 μm) 2 种芯片, 其差异在场效应晶体管及蝶结型天线尺寸 (如图 14)。两种 THz 探测器在 300 GHz 的 THz 源下分别获得了 300×300 和 120×90 的连续 THz 波成像, 空间分辨率达到 3 mm。图 15 为 300 GHz 连续辐射源下采用第一种芯片探测器的透射和反射成像系统对信封中物体进行成像的图像。

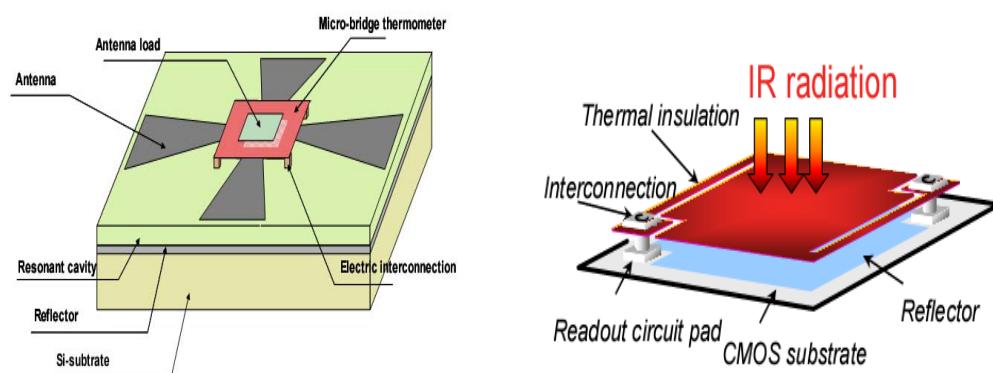


图12 CEA-Leti的THz焦平面探测器像素结构(左图)与微桥结构(右图)示意图
Fig.12 CEA-Leti's THz FPA Pixel structure(left) and micro-bridge structure(right)

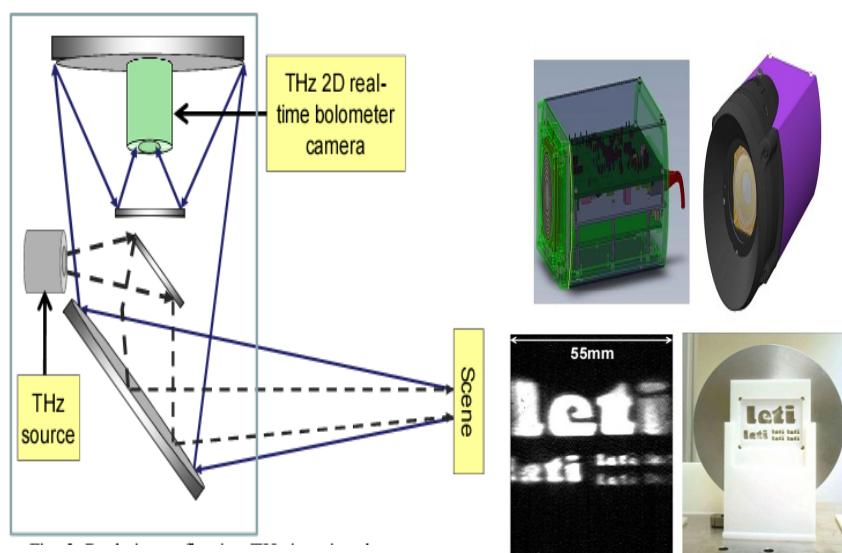


图13 实时连续波反射式THz焦平面相机成像系统及其图像
Fig.13 Real-time CW reflection THz FPA camera imaging system and its images

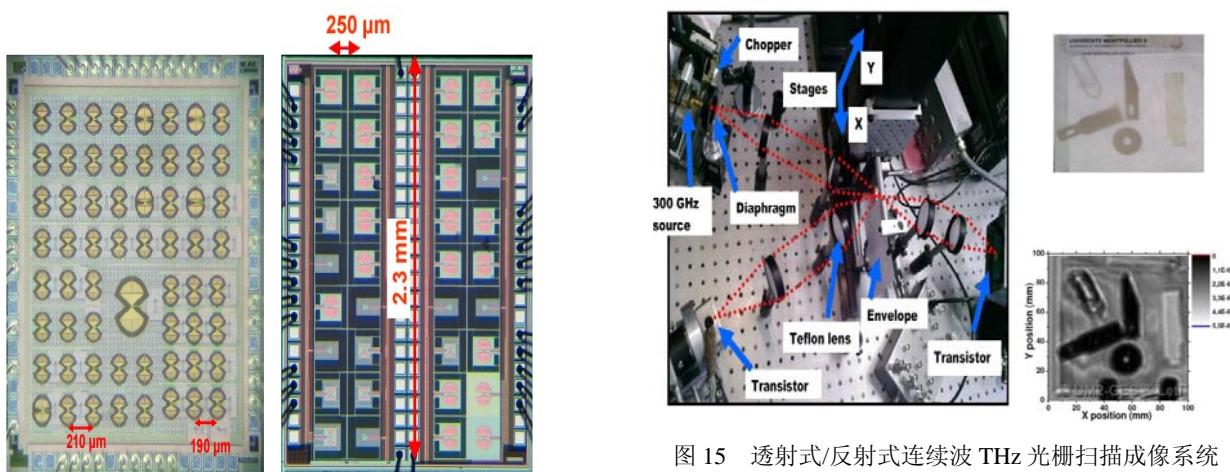


图14 两种CMOS THz探测器芯片结构
Fig.14 Micrograph of two kinds of THz detector chip

图15 透射式/反射式连续波THz光栅扫描成像系统与对信封内物体的成像
Fig.15 Set-up for raster scan imaging in transmission and reflection mode of objects concealed in the paper envelope

近年来, 英国、西班牙等研究了集成动态电感元件(LEKID)用于THz焦平面成像的研究。如图16所示^[23], 英国Cardiff University将200像元的元件(LEKID)用于THz焦平面成像, 并进行测试, 测试表明在1.5 THz处, 探测器NEP为 7×10^{-16} W/Hz^{1/2}。

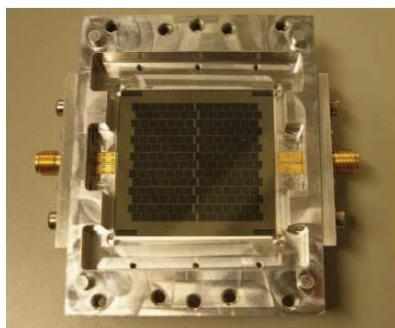


图16 LEKD THz 焦平面探测器

Fig.16 LEKD THz FPA

国内北京理工大学研制了截止频率为2.6 THz的类光混合器的THz探测器件^[24](如图17), 其基本结构由肖特基势垒二极管, 平板天线以及高阻透镜组成。并初步对阵列规模 1×6 , 工作频率为220 GHz的THz类光混合器探测器进行分析研究(如图18)。

4 结束语

目前, THz成像大多采用基于单元/多元探测器的光机扫描第一代成像模式, THz波谱检测不能同时提供目标的图像信息。基于焦平面探测器的凝视

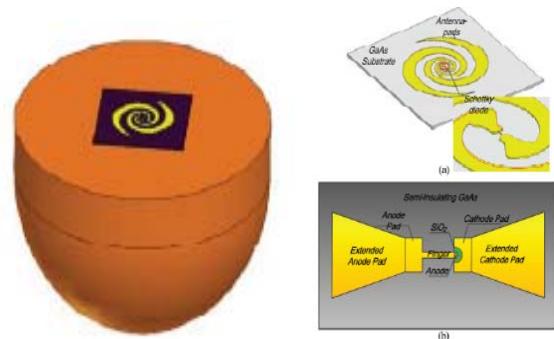


图17 类光混合器3D结构图及其结构示意图

Fig.17 3D model and the principle structure of the quasi-optical mixer

参考文献:

- [1] 张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 葛新浩, 吕默, 钟华, 等. 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其

成像属于第二代成像模式, 是第一代光机扫描成像发展的必然趋势, 具有响应速度快、分辨率高、成像时间短等一系列的优点, 进一步引入成像光谱技术更可望发展为THz波谱成像技术, 属于当今光电成像技术的前沿。因此, THz焦平面探测器及其成像方法的研究不仅可促进先进的THz凝视成像模式发展, 而且可为THz波谱成像模式的拓展奠定基础。

本文综述了国内外THz焦平面探测器及其成像系统发展的现状, 重点总结了基于VO_x的THz焦平面探测器及其成像系统的国内外研究现状和发展趋势。可以看出: 近年来美国、日本、法国等均致力于基于VO_x的THz焦平面探测器及其成像技术的研究, 并且取得了积极的研究进展, 日本NEC已推出基于VO_x的THz相机产品, 并在诸多领域开始应用尝试, 因此, 基于VO_x的THz焦平面探测器已成为当前具有应用发展前景的方向。我国在当前VO_x非制冷焦平面探测器的研究已取得技术突破之际, 即时开展THz焦平面探测器及其成像技术的研究, 可望促进我国THz传感技术的发展, 为诸多行业提供THz成像探测器。同时, 与以往扫描成像模式^[25]及其对THz辐射源^[26]的要求不同, 由于THz焦平面探测器成像属于凝视成像, 其对THz辐射源、THz焦平面探测器的校正和标定、THz成像模式等均提出了一系列需要重点研究的基础理论和关键技术问题。

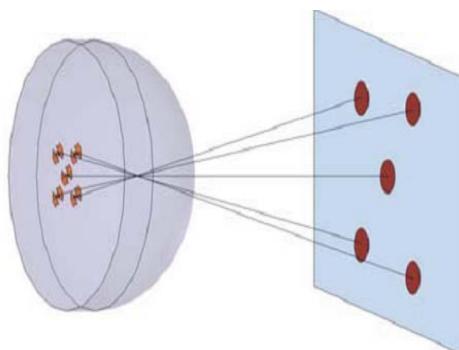


图18 THz 焦平面阵列结构示意图

Fig.18 Schematic of the terahertz focal plane array

- 应用[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(1): 15-18.
- [3] 赵跃进, 朱维文, 董立泉, 等. 被动THz波成像系统单波束扫描成像方法: 中国, CN101846752A[P]. 2010-09-29

- [4] 郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹光谱与成像技术[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(1): 51-56.
- [5] YANG Jun, RUAN Shuang-chen, ZHANG Min, et al. Real-time continuous-wave imaging with a 1.63THz OPTL and a pyroelectric camera[J]. *Optoelectronic Letter*, 2008, **4**(4): 295-298.
- [6] 李琦, 姚睿, 单纪鑫, 等. 基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(s2): 275277.
- [7] Yao Rui, Li Qi, Wang Qi. 1.63 THz transmission imaging experiment by use of a pyroelectric camera array[C]//Proc. of SPIE, 2009, **7277**: 72770D.
- [8] Yao Rui, Li Qi, Ding Sheng hui, et al. Investigation on 2.45 THz array transmission imaging[C]// Proc. of SPIE, 2009, **7385**: 73850P.
- [9] 姚睿, 丁胜晖, 李琦, 等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0111001-1-6.
- [10] Alan W M Lee, Qing Hu. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(19): 2563-2565.
- [11] Alan W M Lee, Benjamin S. Williams, Sushil Kumar, et al. Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320×240 micro-bolometer focal plane array[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(13): 1415-1417.
- [12] Alan W M Lee, Qi Qin, Sushil Kumar, et al. Real-time terahertz imaging over a standoff distance (>25 meters)[J]. *Applied Physics Letter*, 2006, **89**: 141125-1-3.
- [13] Naoki Oda, Hajime Yoneyama, Tokuhito Sasaki, et al. Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser, using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays[C]//Proc. of SPIE, 2008, **6940**: 69402Y-1-6940Y-12.
- [14] Naoki Oda, Masahiko Sano, Kenichi Sonoda, et al. Development of terahertz focal plane arrays and handy camera[C]//Proc. of SPIE, 2011, **8012**: (8012B)1-9.
- [15] Naoki Oda, Alan W M Lee, Tsutomu Ishi, et al. Palm-size terahertz camera and compact quantum cascade laser[C]//Proc. of SPIE, 2012, **8363** (8363A): 1-13
- [16] NEC Corporation, High Sensitivity Real-Time Uncooled THz Imager and Transmission THz Microscope [Z]. 2012, 6.
- [17] 袁俊, 太云见, 雷晓虹, 等. 氧化钒非制冷红外焦平面探测器芯片工艺研究[J]. 红外技术, 2009, **31**(1): 1-4.
- [18] 烟台睿创微纳技术有限公司 [EB/OL]. [2013-3-22]. <http://www.raytrontek.com/>.
- [19] 北京广微积电科技有限公司 [EB/OL]. [2013-3-22]. www.gwic.com.cn/.
- [20] Simoens F, Arnaud A, Castelein P, et al. Development of uncooled antenna-coupled microbolometer array for explosive detection and identification[C]// Proc. of SPIE, **7837** (78370B): 1-11.
- [21] Simoens F, Meilhan J, Lalanne-Dera J, et al. Complete THz system for reflection real-time imaging with uncooled antenna-coupled bolometer arrays[R]. IRMMW-THz 2012 37th International Conference, 2012: 23-28
- [22] Franz Schuster, Maciej Sakowicz, Alexandre Siligarisa. THz Imaging with Low-cost 130 nm CMOS Transistors[C]//Proc. of SPIE, 2010, **7837**: 783704-1-7.
- [23] K P Wood, P D Mauskopf, Doyle S, et al. Recent progress in commercial cryogen-free THz detectors and large format arrays[R]. Infrared Millimeter and Terahertz Waves(IRMMW-THz), 2010 35th International Conference, September, 5-10, 2010: 1-2.
- [24] Mou Jin-Chao, Xu Ming-Ming, Chen Ling, et al. Schottky diodes with the cutoff frequency of 2.6 THz and its applications in focal imaging array[R]. Microwave and Millimeter Wave Technology, 2012 International Conference(ICMMT), May, 5-8, 2012:1-4.
- [25] 魏华. 太赫兹探测技术发展与展望[J]. 红外技术, 2010, **32**(4): 231-234.
- [26] 谷智, 陈沅, 李焕勇, 等. 太赫兹辐射源的研究进展[J]. 红外技术, 2011, **33**(5): 252-256.