

# 2020年太赫兹科学与技术热点回眸

司黎明<sup>1,2</sup>, 徐浩阳<sup>1,2</sup>, 董琳<sup>1,2</sup>, 吕昕<sup>1,2</sup>

1. 北京理工大学信息与电子实验室, 北京 100081

2. 毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室, 北京 100081

**摘要** 2020年太赫兹科学与技术在辐射源、探测器、5G/6G通信、医疗、农业、安检与军事等领域取得了一系列突破性发展,为太赫兹的工程应用和产业化起到了积极的推动作用。对2020年太赫兹科学与技术关键热点,包括6G通信、太赫兹医疗、太赫兹军事应用等进行了概述,并展望了其未来发展。

**关键词** 太赫兹科学与技术;6G通信;太赫兹成像;太赫兹军事

太赫兹波指的是0.1~10 THz的电磁辐射,介于微波毫米波与光学红外线之间,处于低频电子学与高频光子学的过渡阶段(图1)。自20世纪80年代以来,伴随半导体与光电子技术的不断发展,太赫兹科学与技术的研究条件逐渐从实验室走向工业应用。作为近年来受各国政府广泛重视的一个新兴学科和技术领域,太赫兹科学与技术在2004

年被美国评为“改变未来世界的十大技术”之一;在2005年被日本列为“国家支柱性十大重点战略技术”之首。相比于微波和红外光波,太赫兹波具有的非电离、宽带、对非极性材料吸收小等特点,在通信、医疗、军事等领域被认为具有巨大的应用潜力。

2020年,虽然受到新型冠状病毒肺炎疫情的影响,研究者对于太赫兹科学与技术的研究热情却

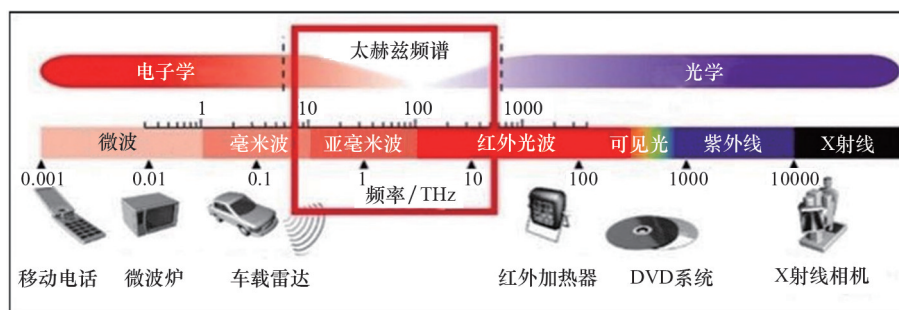


图1 太赫兹频谱位置

收稿日期:2020-12-29;修回日期:2021-01-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF0212103);国家自然科学基金项目(61527805);高等学校学科创新引智计划项目(B14010);北京理工大学创新研究基金项目(3050012211803);北京理工大学国际合作交流项目(BITBLR2020014)

作者简介:司黎明,副教授,研究方向为电磁场与微波技术,电子信箱:lms@bit.edu.cn

引用格式:司黎明,徐浩阳,董琳,等. 2020年太赫兹科学与技术热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 201-211; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.01.017

依旧未减。国内外围绕太赫兹科学与技术开展一系列学术交流会议,包括第45届国际红外毫米波和太赫兹波线上会议(The 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves),中国兵工学会主办的第五届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会,中国电子学会主办的第六届全国太赫兹科学技术学术年会等。日本在年初宣布了拟于东京奥运会上采用100 Gbps数据速率的太赫兹通信系统。11月6日,全球首颗6G试验卫星“星时代-12/天雁05”搭载长征六号遥三运载火箭在太原卫星发射中心成功升空,是中国首个搭载太赫兹载荷的通信卫星。12月18日,中国工程院发布《全球工程前沿2020》报告,太赫兹核心器件及超高速无线应用被列为信息与电子领域的全球工程科技大势和世界工程前沿。

本文围绕太赫兹领域的“卡脖子技术”和重要工程应用,介绍太赫兹科学与技术领域在2020年取得的重要进展,主要包括辐射源、探测器,以及太赫兹通信、医疗、农业、安检、军事等方面的代表性成果和应用。

## 1 太赫兹辐射源

作为太赫兹发展的关键“卡脖子”技术,高功率、高效率的太赫兹辐射源是研究人员需要克服的首要难题。2020年美国能源部埃姆斯实验室的Chirag等<sup>[1]</sup>提出在超导体薄膜中观察到单脉冲激发的太赫兹二次谐波(T-SHG)。这被认为是一个能够产生太赫兹辐射的全新量子现象,其机理主要是通过设计特殊的能带结构,用低频光分量产生非线性超电流,从而获得高效率的太赫兹波。基于该原理,同年8月,日本东京大学低温研究中心的Nakamura等<sup>[2]</sup>在超导体氮化铌(NbN)中观测到太赫兹二次谐波。

在太赫兹真空电子学辐射源方面,中国激光等离子体教育部重点实验室的张杰等研究了相对论强激光与薄膜靶相互作用产生太赫兹辐射的新机制,并与英国卢瑟福实验室合作,实验实现了峰值功率1太瓦( $10^{12}$ W)以上的太赫兹波,该太赫兹辐

射源同时还具有可调谐性(图2)<sup>[3]</sup>。这种超强太赫兹辐射源有望将太赫兹波与物质相互作用推进到极端非线性范畴,为高功率太赫兹辐射源提供新的手段。

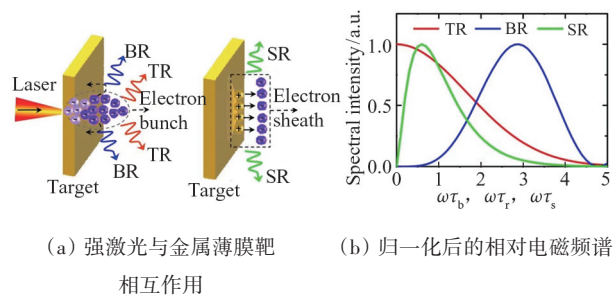


图2 相对论强激光与薄膜靶相互作用产生太赫兹辐射机制

太赫兹量子级联激光器(QCL)被认为巧妙结合了电子学和光子学产生电磁辐射方法,是有效实现固态太赫兹辐射源的手段。2020年,美国麻省理工学院的Khalatpour等<sup>[4]</sup>开发了最高温度250K、工作频率约为4 THz的便携式太赫兹量子级联激光器(图3)。通过在砷化铝镓(AlGaAs)中添加更多的铝成分,防止载流子泄露,再精确地调整分层结构,从而克服了太赫兹量子级联激光器对制冷装置的依赖,推进了室温太赫兹量子级联器的实用化。

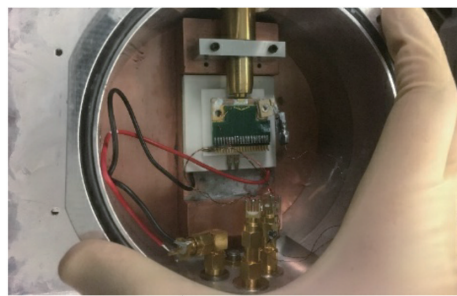


图3 MIT研制的室温便携式太赫兹量子级联激光器

在太赫兹电子器件的研发方面,2020年洛桑联邦理工学院的Matioli等<sup>[5]</sup>开发出一种基于纳米级等离子体(nanoplasma)的新型片上全电子设备,大幅提高了开关速度及输出功率(图4)。该晶体管在工作频率为0.109 THz下实现皮秒级信号切换,速度高于10 V/ps,比传统场效应管高了约2个数量级,获得了600 mW的输出功率。

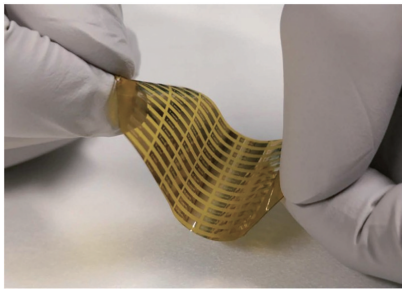


图4 纳米等离子体开关

## 2 太赫兹探测器

在太赫兹探测器的研究方面,国内外研究人员致力于实现高灵敏度、超紧凑、宽频带探测的太赫兹

兹探测器。2020年,瑞士苏黎世联邦理工学院 Yannick 等<sup>[6]</sup>提出了一种光纤耦合的紧凑型等离子体超宽带太赫兹探测器,检测带宽达到 2.5 THz,动态范围为 65 dB,单位长度的转换效率比传统块状非线性晶体高出 1000~10000 倍(图 5)。

在针对不同极化太赫兹波的探测方面,牛津大学克拉伦登实验室 Peng 等<sup>[7]</sup>研制出一种三维交叉纳米线网络的半导体探测器,可测量太赫兹波的全部极化信息,突破了之前太赫兹探测器仅探测一个电磁波极化分量的问题。利用该探测器的全极化探测能力,可以有效应用于测试超材料的复杂介电常数(图 6)。

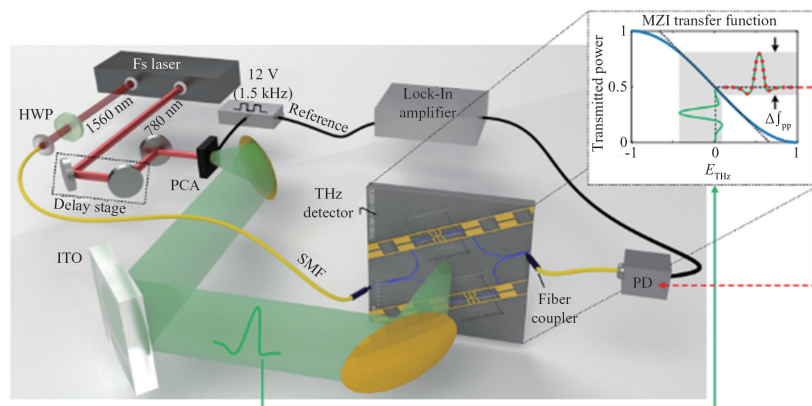


图5 超宽带太赫兹探测器太赫兹时域电光采样

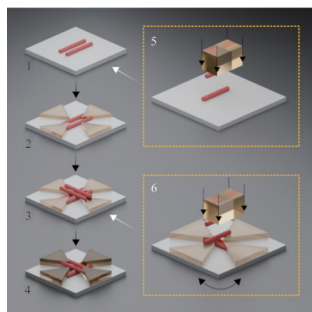


图6 三维交叉纳米线太赫兹探测器设计流程

2020年3月,德国弗劳恩霍夫工业数学研究所 Kutas 等<sup>[8]</sup>将量子传感技术应用于太赫兹探测器。量子传感是根据量子力学原理,利用量子效应设计的测量装置,具有高精度和小体积的特点。该工作理论分析和实验室上给出了测量样品厚度的太赫兹探测器,为量子传感太赫兹探测器的进一步应用做出了贡献。

## 3 太赫兹 6G 通信

基于香农定律,通信的信道容量与绝对带宽成正比。太赫兹频段具有更高的绝对带宽,可以满足不断增长的高数据传输率的无线通信需求。太赫兹通信有望支持更高的用户密度、更少的延迟、更好的频谱利用率,是未来 6G 通信的主要手段。美国、欧盟、日本等国家和组织都在加速发展面向 6G 的太赫兹通信技术。

2020年德国卡尔斯鲁厄理工学院 Harter 等<sup>[9]</sup>将光通信中的 Kramers-Kronig 方案应用到太赫兹频率的高速无线通信中(图 7),提出一种低成本太赫兹接收器设计,采用肖特基势垒二极管作为非线性接收器核心元件,首次试验实现 0.3 THz 载波频率下 115 Gbit/s 数据速率 110 m 距离以上的通信传

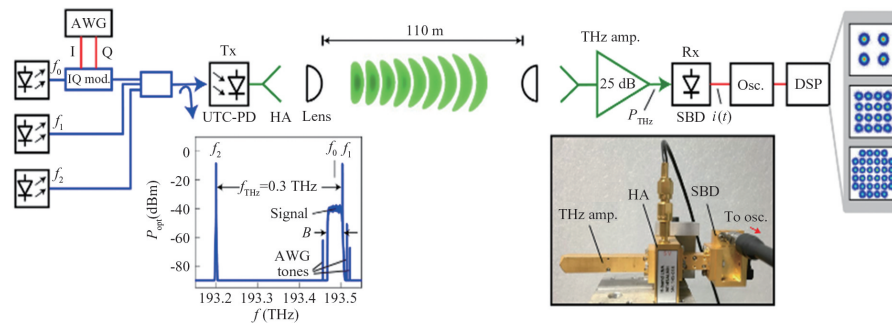


图7 用于太赫兹通信的Kramers-Kronig方案整体设备及实验装置

输<sup>[9]</sup>。该研究指出,广义Kramers-Kronig方案有望成为未来大容量太赫兹通信的主要选择。

实现高速高效的片上通信(图8)是未来6G无线通信、太赫兹集成电路以及芯片间通信互联的基础。当前问题在于标准芯片和封装内部各芯片间的无线链路传输具有很大衰减<sup>[10]</sup>。南洋理工大学的Ranjan等<sup>[11]</sup>研发了一款基于光子拓扑绝缘体的超高速太赫兹无线芯片,实现了以超过10 Gbit/s的数据速率传输0.335 THz频率的太赫兹波,比特误差率低于1000亿分之一。此外,研究人员还利用该芯片以6 Gbit/s的传输速率实时传输了未压缩的

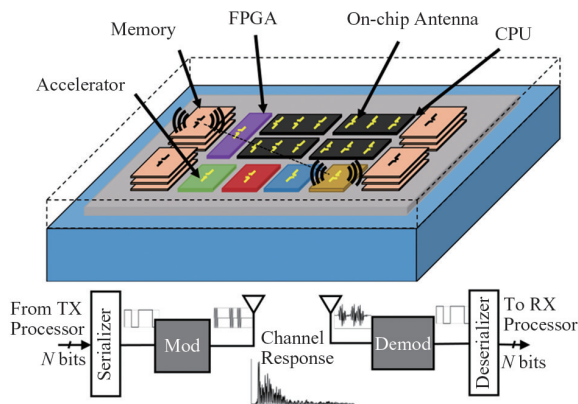


图8 异构计算机体系的片上通信及无线传输过程

4K高清视频(图9)。新研发的光子拓扑绝缘体的信号传输损耗较传统光子晶体可以忽略不计。以拓扑设备支撑的太赫兹通信极大地促进芯片内与芯片间通信,在未来可以支持基于超高速通信的先进技术包括自动驾驶、精密制造和全息通信等。

针对太赫兹通信中链路发现问题,美国莱斯大学Ghasempou等<sup>[12]</sup>将漏波天线与宽带接收机配合使用,提出一种用于单发链路发现的方法。该工作将宽带脉冲太赫兹波以不同角度发射,根据接收器接收到的频率信息,可以快速精确定位覆盖范围内所有接收器,摒弃了传统的顺序试验方法,能够满足未来6G的低延迟要求兼容并在定向网络中实现实时客户端跟踪。

智能反射面(IRS)可以辅助通信,扩大太赫兹通信覆盖范围,从而克服太赫兹信号穿透能力较弱以及路径损耗的问题<sup>[13]</sup>。除此之外,IRS也可用于安全传输。通过智能调整其相位分布,将信号功率导向所需用户,从而减少信息泄露,阿卜杜拉国王科技大学Mohamed-Slim等提出的IRS辅助安全策略能显著提高保密率性能(图10)<sup>[14]</sup>。随着对于IRS性能及应用的不断优化和创新,新一代太赫兹通信系统将为未来的6G通信场景铺平道路。

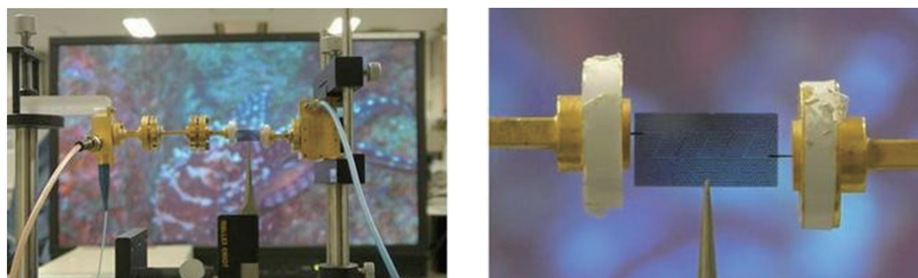


图9 未压缩4K高清视频传输实验测试及样本放大细节展示

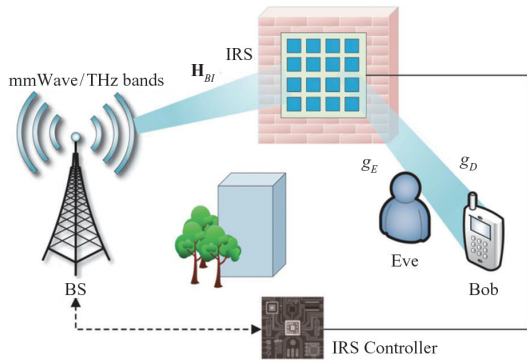


图10 红外辅助保密毫米波/太赫兹系统模型

机器学习可以帮助解决存在的管理挑战,提供更高、更智能的网络应用监控和管理水平<sup>[15]</sup>,提高运行效率。当前该技术已广泛应用于解决超大规模的MIMO系统中频谱效率及功率分配问题<sup>[16-17]</sup>,相信在未来可进一步实现太赫兹通信系统智能化。

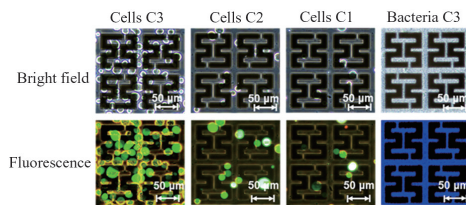
#### 4 太赫兹超材料

超材料因其具有自然材料所不具备的特殊电

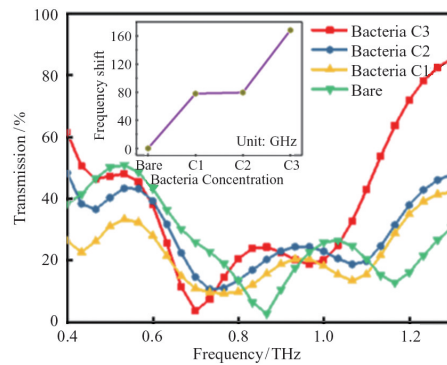
磁性质,自21世纪提出起就广泛引起了各国政府以及科研人员的广泛关注。

超材料对周围环境的介电性质敏感以及生物安全性使其在生物传感中有着极大的发展潜力。2020年,北京航空航天大学聂天晓团队通过集成非对称双分裂环谐振腔超材料和铁磁异质结自旋电子太赫兹发射器,首次实现了单片太赫兹发射生物传感器(TEB)(图11(a))。该传感器基于自旋子THz辐射与超材料上生物样品之间的相互作用,使超材料的共振频率随着Hela细胞和假单胞菌浓度的增加发生红移现象(图11(b)),从而实现小空间内高精度的生物传感功能<sup>[18]</sup>。

基于超材料的太赫兹电磁干扰屏蔽(EMIS)材料,可以克服自然界中缺少能够有效屏蔽太赫兹波辐射的天然材料的问题。2020年,华中科技大学涂良成研究团队设计并验证了一种基于石墨烯-垂直排列碳纳米管杂化物的柔性超宽带太赫兹吸波器(图12),其工作带宽可达100%(以大于0.9的吸收率为标准),在0.2~3.0 THz范围内的平均功率



(a) TEB中不同浓度生物样品(c1、c2、c3)的亮场和荧光照片



(b) 不同浓度下的太赫兹透射频谱插图为不同浓度的频移值

图11 不同浓度下TEB显微图像和相对应太赫兹透射频谱

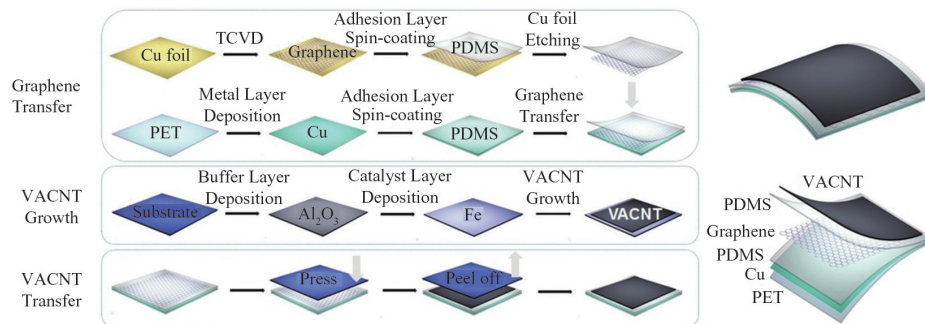


图12 柔性超宽带太赫兹波吸收器结构及制造工艺

吸收率为0.986。该吸波器对于高达 $601^\circ$ 的大范围入射角表现出良好的吸收性能并且可以在不同的弯曲状态下正常工作<sup>[19]</sup>。厦门大学电磁声学研究所的宋争勇等提出了一种基于二氧化钒-石墨烯混合结构的双可调谐吸波器(图13),通过改变二氧化钒金属或介电状态以及调节石墨烯的费米能级,成功实现了0.4 THz 频率下吸收率45.3%~94.5%以及1.0 THz 吸收率31%~96.3%的动态可调<sup>[20]</sup>。随着材料和结构的不断创新,宽带可调谐太赫兹吸波器大规模应用指日可待。

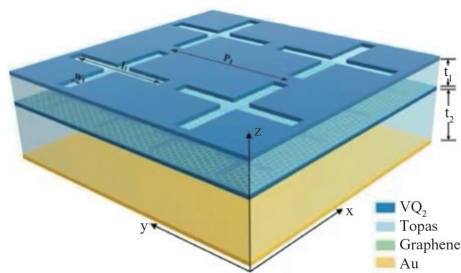


图13 双可调谐吸波器结构

## 5 太赫兹医疗与农业

近年来,太赫兹科学与技术医学研究中发挥积极作用,为众多应用场景提供新型医疗手段。目前太赫兹光谱技术已应用于肺癌、胰腺癌、神经胶质瘤等肿瘤检测中。2020年,俄罗斯ITMO大学太赫兹生物医学实验室Roman等在0.2~1 THz 频率范围内获得了不同程度胃癌粘膜的折射率和吸收系数,证明了癌症组织具有比正常组织更高的光学特性,根据此差异将正常胃组织与癌症组织进行区分(图14)<sup>[21]</sup>。陕西省超快光电技术与太赫兹科学重点实验室的研究人员使用基于波前倾斜技术的太赫兹单次测量系统实现了皮秒时间范围内活体HeLa细胞太赫兹脉冲时域波形的瞬态检测(图15)<sup>[22]</sup>。

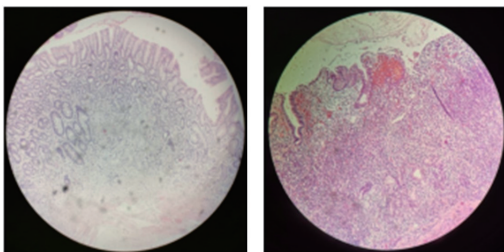


图14 正常胃组织与局部癌症组织

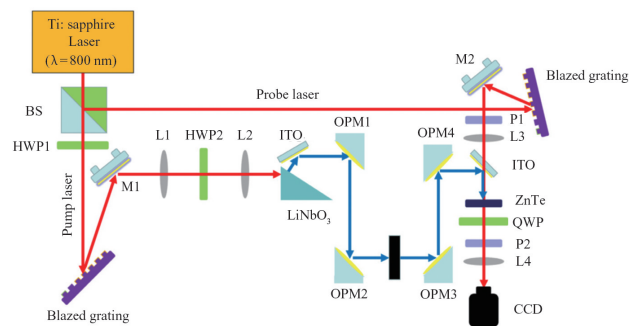


图15 基于倾斜波前的THz瞬态测量系统

与人工智能算法相结合的检测方案因其高效准确的优势成为辅助医疗研究的热点话题。福州大学光学与太赫兹及无损检测实验室利用太赫兹光谱成像(TPI)系统将检测结果样本采用主成分分析和最小二乘支持向量机(LS-SVM)方法进行分类学习,在预测集内分类结果准确率高达92.22%,成功识别出前列腺癌石蜡组织块中的肿瘤区域<sup>[23]</sup>。此外,中国科学院深圳先进技术研究院提出并验证了一种基于小波熵特征提取和机器学习分类器的乳腺浸润性导管癌太赫兹脉冲信号自动识别策略(图16),能够快速高效地识别不同乳腺组织<sup>[24]</sup>。

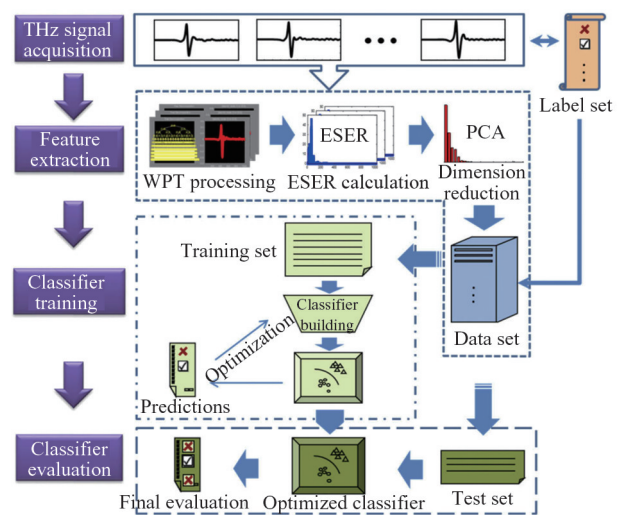
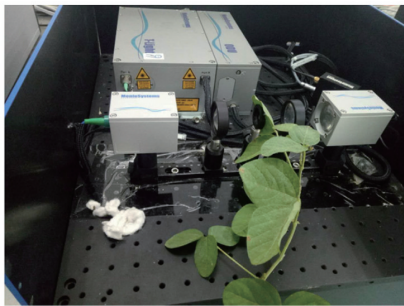


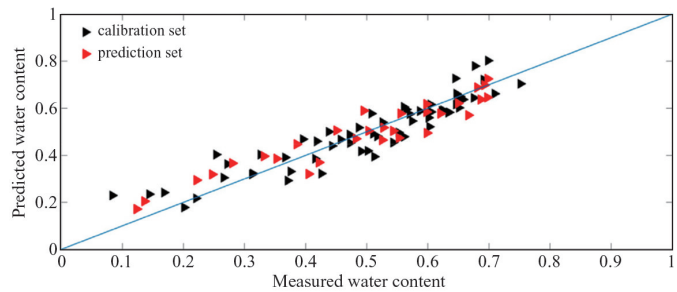
图16 乳腺组织样本在太赫兹时域信号自动识别策略流程

农业及食用产品和人类的生产生活密切相关,直接关系到人们的健康与社会发展。2020年,北京市农林科学院利用太赫兹时域光谱技术对大豆的叶片含水量(LWC)进行检测,基于该样本结果

建立了高精度 LWC 预测数学模型,图 17(a)为试验过程。利用该模型研究了不同水平的水分胁迫、不同生长介质等条件对 LWC 的影响,试验得到的预测集相关系数和均方根误差分别为 0.9153 和 0.0526(图 17(b))<sup>[25]</sup>。西南大学的朱世平等<sup>[26]</sup>收集转基因与非转基因大豆样品的太赫兹时域光谱并转换为 0.1~2.5 THz 的太赫兹频域频谱,基于优化



(a) 利用太赫兹时域光谱技术检测 LWC



(b) 使用偏最小二乘法(PLS)模型的预测结果

图 17 LWC 检测过程及模型预测结果

## 6 太赫兹成像

太赫兹成像技术具有强大的灵活性和高分辨率特点,在无损检测、安检等方面具有极高应用价值,已成为太赫兹领域的研究热门。

单像素相机因其低成本以及卓越的耐用性,已经成为多像素相机的替代品。工作原理为人们运用时变的空域掩模对光束进行编码,并通过单像素

探测器记录来自物体的透射或反射,将空间模式和探测器的读数结合,以重建物体的图像。香港中文大学 Stantchev 等使用单像素光纤耦合光电导太赫兹检测器,完成了实时显示的太赫兹视频(32×32 像素,每秒 6 帧)的采集(图 18),大大优于先前成果(8×8 像素,每秒 1 帧)<sup>[27]</sup>。优化后的单像素太赫兹相机不仅制造过程未变复杂,后处理速度也保持较高水平。

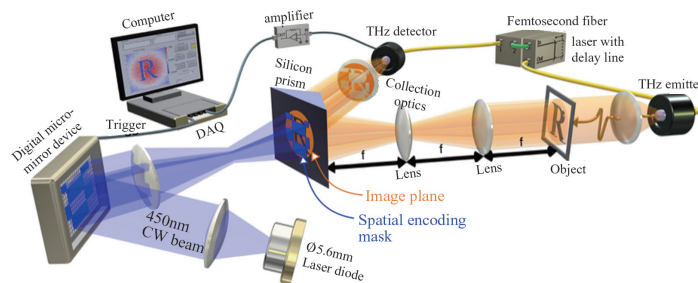


图 18 利用单像素太赫兹相机进行实时视频采集

中国工程物理研究院流体物理研究所的朱礼国等<sup>[28]</sup>开发了一种超衍射分辨的太赫兹显微仪(GHOSTEAM)(图 19)。它使用基于鬼成像技术的自旋电子太赫兹发射器阵列(STEA)来进行太赫兹近场显微,利用可重构的 STEA 照明物体并计算相

关性,以微米量级分辨率来重建物体图像。

太赫兹安检仪拥有较高的安全性和高质量图像分辨率,目前面临的主要问题是成像速度低(典型的帧速率为 1 fps),尚无法满足大客流量的应用场景。多输入多输出合成孔径雷达 MIMO-SAR 技

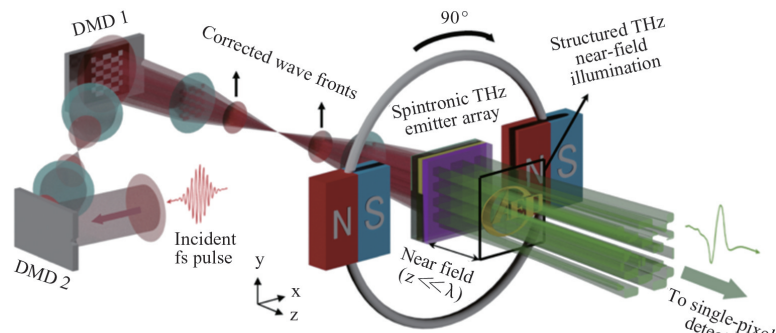


图19 GHOSTEAM太赫兹显微镜

术既可以保证分辨率同时又降低阵元数量,在安检方面有着重要的应用价值(图20<sup>[29]</sup>)。2020年,针对远程安检应用中高效、安全和快速成像的迫切需求,俄罗斯科学院固体物理研究所Gombo等<sup>[30]</sup>开发了一种新型太赫兹安全扫描仪,可以在3~6 m的间隔范围内进行检测,相应的横向分辨率为3~6 cm,景深约为30 cm(图21),检测区域在不同角度被最大程度照射,反射后利用物镜收集并投射到成像相机上。在未来,具有视频速度成像的远场太赫兹安检仪的研发及商用是研究人员需要克服的挑战。

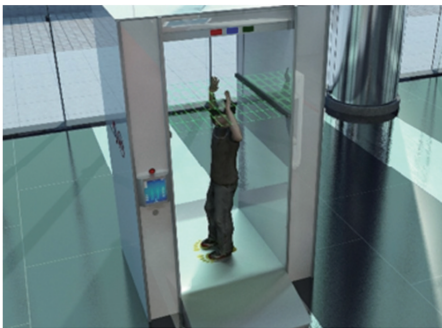


图20 MIMO-SAR三维太赫兹成像

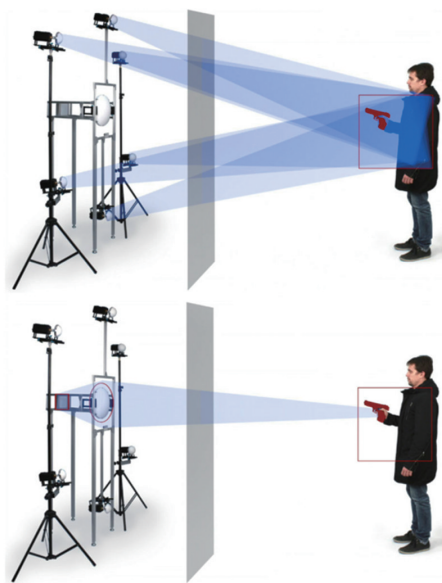


图21 距离为3 m的反射模式下扫描仪操作示意

在该项目支持下,美国BAE Systems公司开发了新一代太赫兹混合信号电子产品,拟提高战场作战人员的态势感知和生存能力。据军队采购网公开招标项目信息统计显示,中国2020年在太赫兹雷达、态势感知、精确制导等太赫兹军事相关项目上的投入提高。

太赫兹雷达的信息承载能力强,检测精度和角度分辨率高,在战场侦察、目标识别和跟踪方面具有很大的优势。利用太赫兹雷达可以实现全天候探测隐身飞机,其体积小、重量轻、机动性高等优点又非常适合短距离火控系统<sup>[32]</sup>。太赫兹载荷将改变情报侦测方式,可以探测到各个国家地下结构或用掩体掩盖的武器系统,提高发现并打击关键军事目标的能力。

## 7 太赫兹军事应用

太赫兹科学与技术军事领域展现出巨大的应用潜力,包括机载情报监视侦察(ISR)系统、空间态势感知、导弹防御以及空中监视雷达系统等(图22)。各国不断增加对于太赫兹军事项目的投入。2020年初,美国国防高级研究计划局(DAPRA)启动混合模式超大规模集成电路(T-MUSIC)项目,旨在为军事太赫兹雷达和通信提供高性能的芯片<sup>[31]</sup>。

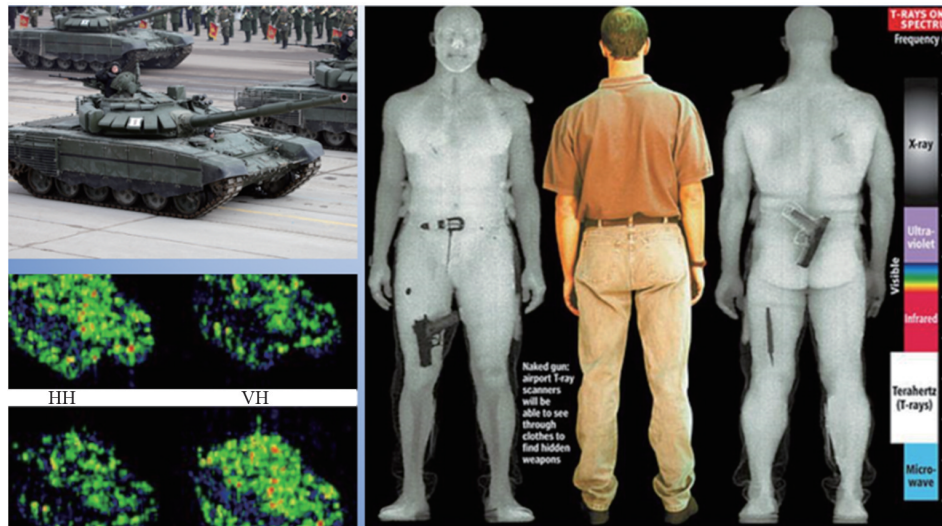


图22 太赫兹成像用于目标探测及安全监测

可以想象在未来,无人机自动识别在集装箱里装有毒品的海上船只,太赫兹雷达可以探测到“隐身”飞机,战场上大数据实时更新并迅速传输到嵌入人工智能节点的服务器中,为军事指挥官提供作战图景及建议。在太赫兹科学与技术的支撑下必将迎来新的军事战略形态。

## 8 结论

2020年,太赫兹科学与技术被进一步应用到通信、成像、生物、医疗、军事等相关领域,发挥了越来越重要的作用。展望未来,太赫兹通信必将成为6G通信的研究热点;太赫兹成像为医疗、农业、无损检测、安检等提供更加快捷高效的解决方案;太赫兹态势感知与识别已成为各国军备竞赛中争取制高点的“卡脖子”技术;通过与人工智能大数据相融合,太赫兹科学与技术的应用范围也会越来越深入和广泛。

### 参考文献(References)

- [1] Vaswani C, Mootz M, Sundahl C, et al. Terahertz second-harmonic generation from lightwave acceleration of symmetry-breaking nonlinear supercurrents[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(20): 207003.
- [2] Nakamura S, Katsumi K, Terai H, et al. Nonreciprocal terahertz second-harmonic generation in superconducting NbN under supercurrent injection[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(9): 097004.
- [3] Liao G Q, Liu H, Scott G G, et al. Towards terawatt-scale spectrally tunable terahertz pulses via relativistic laser-foil interactions[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(3): 031062.
- [4] Khalatpour A, Paulsen A K, Deimert C, et al. High-power portable terahertz laser systems[J]. *Nature Photonics*, 2020, 1: 1-5.
- [5] Salamin Y, Jafari A, Matioli E, et al. Nanoplasma-enabled picosecond switches for ultrafast electronics[J]. *Nature*, 2020, 579(7800): 534-539.
- [6] Salamin Y, Benea-Chelmus I C, Fedoryshyn Y, et al. Compact and ultra-efficient broadband plasmonic terahertz field detector[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5550.
- [7] Peng K, Jevtics D, Zhang F, et al. Three-dimensional cross-nanowire networks recover full terahertz state[J]. *Science*, 2020, 368(6490): 510-513.
- [8] Kutas M, Haase B, Bickert P, et al. Terahertz quantum sensing[J]. *Science Advances*, 2020, 6(11): 1-8.
- [9] Harter T, C. Füllner, Kemal J N, et al. Generalized Kramers-Kronig receiver for coherent terahertz communications[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(10): 1-6.
- [10] Abadal S, Han C, Jornet J M. Wave propagation and channel modeling in chip-scale wireless communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(10): 6880-6892.

- tions: A survey from millimeter-wave to terahertz and optics[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 278–293.
- [11] Yang Y, Yamagami Y, Yu X, et al. Terahertz topological photonics for on-chip communication[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(7): 446–451.
- [12] Ghasempour Y, Shrestha R, Charous A, et al. Single-shot link discovery for terahertz wireless networks[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1–6.
- [13] Ma X Y, Chen Z, Chen W, et al. Intelligent reflecting surface enhanced indoor terahertz communication systems[J]. *Nano Communication Networks*, 2020, 24: 100284.
- [14] Qiao J, Alouini M S. Secure transmission for intelligent reflecting surface-assisted mm wave and terahertz systems[J]. *IEEE Wireless Communication Letters*, 2020, 9(10): 1743–1747.
- [15] Du J, Yu F R, Lu G, et al. MEC-assisted immersive VR video streaming over terahertz wireless networks: A deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9517–9529.
- [16] Yan L, Han C, Yuan J. A Dynamic array-of-subarrays architecture and hybrid precoding algorithms for terahertz wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(9): 2041–2056.
- [17] Zhang H, Zhang, Liu W, et al. Energy efficient user clustering and hybrid precoding for terahertz MIMO-NOMA systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(9): 2074–2085.
- [18] Bai Z, Liu Y, Kong R, et al. Near-field terahertz sensing of hela cells and pseudomonas based on monolithic integrated metamaterials with a spintronic terahertz emitter[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(32): 35895–35902.
- [19] Xiao D, Zhu M, Wang Q, et al. A flexible and ultra-broadband terahertz wave absorber based on graphene-vertically aligned carbon nanotube hybrids[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(21): 7244–7252.
- [20] Liu W, Song Z. Terahertz absorption modulator with largely tunable bandwidth and intensity[J]. *Carbon*, 2020, doi: 10.1016/j.carbon.2020.12.001.
- [21] Grigorev R, Kuzikova A, Demchenko P, et al. Investigation of fresh gastric normal and cancer tissues using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Materials*, 2020, 13(1): 1–10.
- [22] Shi W, Wang Y, Hou Lei, et al. Detection of living cervical cancer cells by transient terahertz spectroscopy[J]. *Journal of Biophotonics*, 2020: e202000237.
- [23] Zhang P, Zhong S C, Zhang J X, et al. Application of terahertz spectroscopy and imaging in the diagnosis of prostate cancer[J]. *Current Optics and Photonics*, 2020, 4(1): 31–43.
- [24] Liu W, Zhang R, Ling Y, et al. Automatic recognition of breast cancer based on terahertz spectroscopy with wavelet packet transform and machine learning[J]. *Biomedical Optics Express*, 2020, 170: 105239.
- [25] Li B, Zhao X T, Zhang Y, et al. Prediction and monitoring of leaf water content in soybean plants using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 29(9): 098705.
- [26] Wei X, Zheng W Q, Zhu S P, et al. Application of terahertz spectrum and interval partial least squares method in the identification of genetically modified soybeans[J]. *Spectrochimica Acta Part a-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 238: 1–8.
- [27] Stantchev R I, Yu X, Blu T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2535.
- [28] Chen S C, Feng Z, Li J, et al. Ghost spintronic THz-emitter-array microscope[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 99.
- [29] 刘杰, 安健飞, 周人, 等. 应用在人体安检中的太赫兹近场 MIMO-SAR 技术[J]. *光电工程*, 2020, 47(5): 90–100.
- [30] Tzydynzhapov G, Gusikhin P, Muravev V, et al. New real-time sub-terahertz security body scanner[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2020, 41(6): 632–641.
- [31] Helfrich E. T-MUSIC program to develop integrated mixed-mode RF electronics[EB/OL]. (2020-02-07) [2020-12-15]. <https://militaryembedded.com/radar-ew/rf-and-microwave/t-music-program-to-develop-integrated-mixed-mode-rf-electronics>
- [32] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging—modern techniques and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(1): 124–166.

## Terahertz technology hot spots in 2020: A review

SI Liming<sup>1,2</sup>, XU Haoyang<sup>1,2</sup>, DONG Lin<sup>1,2</sup>, LV Xin<sup>1,2</sup>

1. Laboratory of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** In 2020, terahertz science and technology made a series of breakthroughs in the fields of radiation source, detector, 5G/6G communication, medical, agriculture, security inspection, military, etc. These achievements are playing a positive role in promoting engineering application and industrialization of terahertz. In this paper, key hotspots of terahertz science and technology, including 6G communication, terahertz medical terahertz military application, are summarized and their development trends are prospected.

**Keywords** terahertz science and technology; 6G communication; terahertz imaging; terahertz military ●



(责任编辑 徐丽娇)