

文章编号: 1672-8785(2024)07-0001-08

场效应晶体管太赫兹探测器在太赫兹成像领域的研究进展(上)

靳晨阳^{1,3,5} 康亚茹^{1,3} 黄 镇⁶ 赵永梅^{1,2,4,5} 颜 伟^{1,5*}李兆峰^{1,2,3,5*} 王晓东^{1,2,3,5} 杨富华^{1,2,5}

(1. 中国科学院半导体研究所半导体集成技术工程研究中心, 北京 100083;

2. 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

3. 中国科学院大学集成电路学院, 北京 100049;

4. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;

5. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

6. 湖北九峰山实验室研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 太赫兹 (Terahertz, THz) 波具有能量低、穿透性强、分辨率高等特性, 因而 THz 成像技术在安全检测、医学诊断、无损探伤等领域具有广阔的应用前景。THz 探测器作为 THz 成像系统的重要组成部分, 其性能对成像分辨率、成像速度等有重要影响。由于具备可室温工作、易大面积集成、响应速度快等特性, 场效应晶体管 (Field Effect Transistor, FET) THz 探测器在成像应用中潜力巨大。综述了近年来 FET THz 探测器在 THz 成像领域的研究进展 (包括成像阵列、材料选择等方面), 分析了设计和制造中存在的问题; 指出天线和像素间距是限制大规模阵列化的重要因素, 并在此基础上对未来的研究方向进行了展望; 指出新的材料和结构设计将进一步改善器件性能, 从而实现更快速、更清晰的 THz 成像。

关键词: 太赫兹成像; 场效应晶体管; 太赫兹探测器; HEMT; CMOS; 低维材料

中图分类号: TN386 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.07.001

Research Progress of Field Effect Transistor Terahertz Detector in Terahertz Imaging (I)

JIN Chen-yang^{1,3,5}, KANG Ya-ru^{1,3}, HUANG Zhen⁶, ZHAO Yong-mei^{1,2,4,5}, YAN Wei^{1,5*},LI Zhao-feng^{1,2,3,5*}, WANG Xiao-dong^{1,2,3,5}, YANG Fu-hua^{1,2,5}

(1. Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of

收稿日期: 2024-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61971395; 52075519)

作者简介: 靳晨阳 (2000-), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹探测器。

*通讯作者: E-mail: yanwei@semi.ac.cn (颜伟); lizhaofeng@semi.ac.cn (李兆峰)

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

*4. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

*5. College of Materials Science and Opto-Electronics Technology, University of
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

6. Research Center, HuBei Jiufengshan Laboratory, Wuhan 430074, China)

Abstract: Terahertz (THz) waves have characteristics such as low energy, strong penetration, and high resolution. Therefore, THz imaging technology has broad prospects in areas such as security inspection, medical diagnosis, and non-destructive testing. As an important component of THz imaging systems, the performance of THz detectors has a significant impact on imaging resolution and speed. Field effect transistor (FET) THz detectors, due to their characteristics of room temperature operation, easy large-scale integration, and fast response speed, have enormous potential in imaging applications. This paper reviews the research progress of FET THz detectors in the field of THz imaging in recent years, including advances in imaging arrays, material selection, and analysis of existing design and manufacturing issues. It points out that the antenna and pixel spacing are important factors limiting large-scale arraying. Based on this, it provides an outlook on future research directions, indicating that new materials and structural designs will further improve device performance, achieving faster and clearer THz imaging.

Key words: terahertz imaging; field effect transistor; terahertz detector; HEMT; CMOS; low dimensional material

0 引言

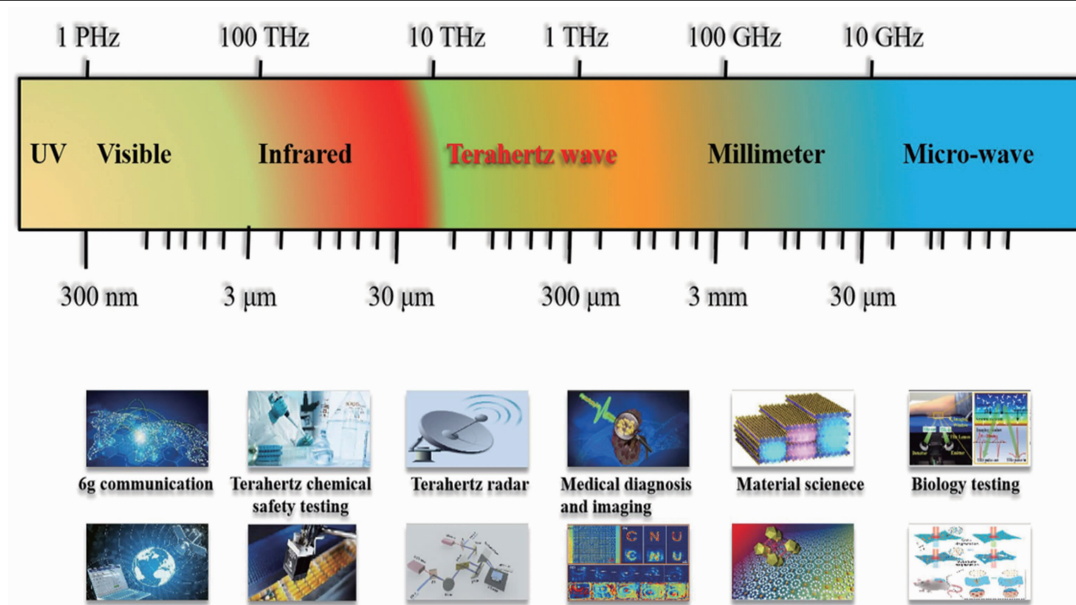
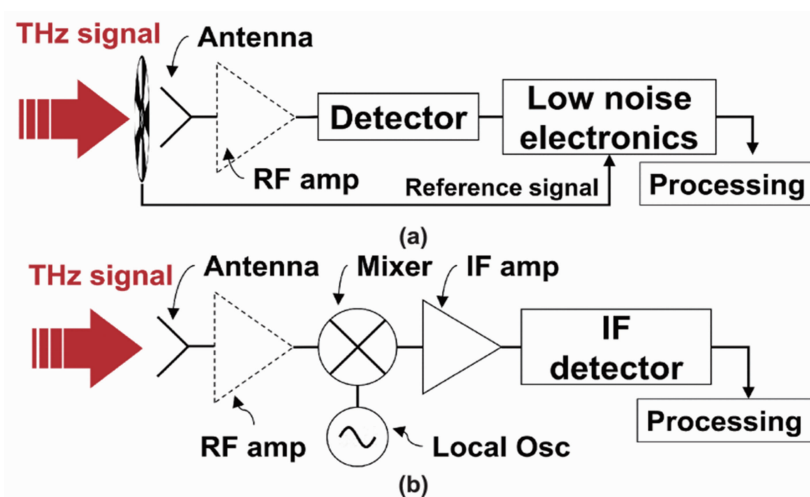
20 世纪 70 年代, 研究人员利用光泵浦波导激光器和砷化镓探测器得到了第一张 THz 图像^[1], 开创了利用 THz 波成像的先河。随后在 1995 年, 第一个 THz 时域光谱实时成像系统被开发出来^[2], 引起了研究人员的极大兴趣。在过去的二十几年里, THz 成像科学取得了巨大的进步^[3]。事实证明, THz 成像领域是一个极具潜力并富有成果的领域, 而且已经有相当多的技术从实验室走向了商用^[4-6]。

THz 成像是利用 THz 波段的电磁波来成像。THz 波, 即频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波, 也有文献将 0.3~3 THz 频率范围内的电磁波定义为 THz 辐射^[7]。THz 波位于毫米波与红外线之间^[8], 处于宏观电子学向微观光子学的过渡区域, 具有独特的电子学与光子学特性。电磁波谱如图 1 所示^[9]。

使用 THz 辐射成像有许多优点, 其中最重要的是: THz 波处于毫米波与红外线之间,

THz 成像可以得到与毫米波、红外线、可见光、紫外线以及 X 射线成像不同的信息, 是它们的有力补充^[3]。与频率更低、波长更长的毫米波成像相比, THz 成像具有更高的空间分辨率。与更高频的红外、可见光成像相比, 它又具有良好的透射性, 可以很容易穿透大多数非金属及非极性材料, 如纺织物、纸板、塑料等^[10]。与紫外线或 X 射线不同, THz 波的光子能量较小, 是非电离的, 适用于人类或其他生物样品的活体检查^[11]。此外, 大多数极性分子和生物大分子在此波段表现出强烈的吸收与谐振, 呈现出丰富的物理和化学信息。由于这些特性, THz 成像技术在医学成像、安全检查、无损检测等领域具有广阔的应用前景^[12]。

本文将概述 FET THz 探测器在成像领域的最新研究进展。首先介绍 THz 成像的方式以及衡量 THz 探测器性能的主要参数, 然后重点介绍 FET THz 探测器的相关研究进展, 并简述该探测器在成像领域面临的主要问题以及可能的解决方法。最后总结全文并对 FET THz 探测器的未来进行展望。

图 1 电磁波谱^[9]图 2 THz 探测系统的结构示意图: (a)直接探测; (b)外差探测^[11]

1 THz 成像

1.1 THz 成像的方式

根据成像机制的不同, THz 成像可分为主动式成像和被动式成像两种。

被动式成像是指 THz 探测器对被测物体本身的 THz 辐射进行探测, 将宽带 THz 噪声转换为时域电压信号, 并最终产生反映背景与物体之间辐射差异的图像^[13]。它无需额外 THz 辐射源, 成本低廉且非常安全。但由于被动成像仅依赖于热辐射, 系统对探测器灵敏度的要求较高^[14]。

主动式成像主要通过 THz 源发射一定强

度的 THz 辐射照射被测物体, 利用 THz 探测器接收反射波或者透射波, 将接收到的信号的振幅和相位信息进行分析处理, 得到被照射物体的图像。

THz 主动式成像又可以分为两类: 直接探测和外差探测。二者的根本区别在于, 直接探测只能探测 THz 辐射的振幅, 而外差探测则可以探测辐射的相位与幅度。

在直接探测中, THz 辐射经天线耦合入器件, 转换为直流信号输出。在外差探测中, 入射的 THz 高频(High Frequency, HF)信号首先通过混频器与本地信号混频, 被下变频为较

低频率的中频(Intermediate Frequency, IF)信号,然后再输入到探测器进行下一步处理^[11]。两种探测系统的结构示意图如图2所示。

相比于直接探测,一般外差探测在较低的THz频段可以产生质量更好的图像,具有更高的清晰度以及更大的动态范围^[15]。此外,外差探测最重要的优势是可以显示被探测物体表面具有高度差的结构细节^[16]。图3展示了在直接和外差模式下获得被包裹的药片的图像。外差模式下的图像展示了药片中央的凹槽结构,这是直接探测做不到的。

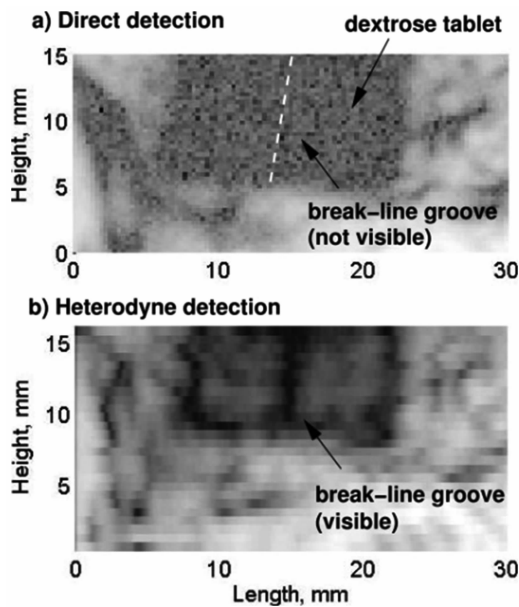


图3 包裹在塑料袋中并隐藏在纸质信封内的葡萄糖片的扫描图像:(a)直接探测模式下的图片;(b)外差探测模式下的图片(可以看到中心断裂线的凹槽结构细节)^[16]

值得注意的是,直接探测器具有比外差探测器更宽的带宽,并且适合在较高频率范围内进行检测;直接检测系统更简单、紧凑,易设计大型阵列^[11]。而外差探测器由于结构复杂,不易大面积阵列化。因此,要根据实际的应用目的、探测器灵敏度和响应速度等要求来选择探测系统。

1.2 THz 成像系统的重要参数

THz 探测器作为 THz 成像系统的关键部件,备受人们关注。近年来,出现了多种 THz

探测器。这些探测器采用不同的探测机制,例如热、光子或非线性组件的整流^[11]。根据探测机制的不同,THz 探测器的工作温度也不一致,有些探测器需要工作在低温,而有些探测器则可以室温工作。常见的在低温下工作的 THz 探测器有测热辐射计、热电子微型测热辐射计、超导隧穿结探测器等;室温下工作的探测器有高莱探测器、热释电探测器、肖特基二极管探测器和 FET THz 探测器等。

对于一款 THz 探测器,它的成像性能一般通过响应度、噪声等效功率(Noise Equivalent Power, NEP)以及响应时间等参数来表示。其中,响应度是指探测器输出信号与实际照射到探测器上 THz 波的功率比值。输出信号通常分为电压或电流,其定义分别为电压响应度 R_v 和电流响应度 R_i ^[11]:

$$R_v = \frac{V_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

$$R_i = \frac{I_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

式中, P_{in} 为实际照射到探测器上的 THz 波功率。

NEP 是指探测器能探测到的最小目标辐射,标志着一个探测器的灵敏度,理论上计算为噪声电压与电压响应度的比值:

$$NEP = \frac{N_v}{R_v} \quad (3)$$

式中, N_v 为晶体管热噪声电压谱密度, R_v 为电压响应度。

响应度和 NEP 是衡量一个探测器性能的重要指标。高的响应度和低的 NEP 是优秀探测器应该具备的必要条件。研究人员常常通过各种方法来提高器件的响应度并降低 NEP,例如设计合适的天线和硅透镜。

像素数是指成像芯片上的探测器个数(即物理像素数)。更多的像素数意味着更快的成像速度和更大的空间带宽积,可以捕捉更多的细节,从而得到更高质量的图像^[17]。

响应时间是指探测器接收到 THz 信号的瞬间到可以正常工作的反应时间。在各种探测器中, FET THz 探测器的响应速度最快。

表 1 常见 THz 探测器的性能比较

探测器类型	NEP/ ($\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	响应度/ ($\text{V} \cdot \text{W}^{-1}$)	响应 时间/s	工作 温度/K	频率范围/ THz	引用
测热辐射计*	$10^{-16} \sim 10^{-13}$	$10^7 \sim 10^5$	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	≤ 4.2	0.1~30	[19]
热电子测热辐射计*	$10^{-19} \sim 10^{-17}$	10^9	10^{-8}	≤ 0.3	0.1~30	[20]
超导隧穿结探测器 [#]	10^{-16}	10^9	10^{-3}	≤ 0.8	0.1~1	[21]
高莱探测器*	10^{-9}	10^4	10^{-2}	300	0.02~20	[18]
热释电探测器*	10^{-10}	10^5	10^{-2}	240~350	0.1~30	[22]
肖特基二极管探测器 [#]	10^{-12}	10^3	10^{-11}	10~420	0.1~1.7	[23]
高电子迁移率晶体管探测器**	10^{-11}	10^3	10^{-11}	4.2~420	0.1~4	[24]
硅基场效应管探测器**	10^{-10}	10^2	10^{-9}	10~420	0.1~2	[25]

注: *热探测器; [#]光探测器; ** FET 探测器

动态范围的定义为图像传感器最大和最小可检测信号之间的比率, 决定了在分辨率图像中可实现的最大对比度^[17]。

除了关注以上性能参数之外, 一款商用 THz 探测器也需要关注制造成本以及使用年限。更低的成本和更高的使用年限也是研究人员一直追求的目标。

低温探测器的响应度普遍较高, 且 NEP 较低, 但一般它们的体积较大, 响应时间也较长^[10]。而高莱探测器和热释电探测器虽然工作在室温下, 但其响应速度较慢^[18]。利用热检测机制的探测器普遍响应速度慢、体积较大, 并需要外部滤波器才能具有频率选择性。这些特性限制了它的发展。

肖特基二极管探测器以及基于 FET 的探测器在室温下就具有极高的响应速度, 且体积较小^[17]。虽然响应度和 NEP 性能不及其他探测器, 但在降低制造成本、发展紧凑型探测器的前提下, 它们具有不可比拟的优势。常见 THz 探测器的性能比较见表 1。

大多数成像系统主要基于锁定技术操作单个探测器来获取帧率为分钟级的光栅扫描成像^[26], 一些已有应用的总成像时间从几十分钟到几十小时不等^[27]。为了充分发挥 THz 成像在实际应用中的潜力, 研究人员通过开发 THz 焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)来缩短成像时间和减小成本。对于像素数足够大的 FPA 芯片, 甚至可以实现高速、实时成像

或者视频成像^[28]。

同时, 为了兼容现有的互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Transistor, CMOS)工艺, 最近的大部分发展都针对 3 种类型的 FPA: 与 CMOS 工艺兼容的肖特基二极管、依赖等离子体整流现象的 FET 以及 THz 频率范围内的红外测辐射热计^[29]。其中, 探测器响应时间在毫秒范围内的测辐射热计 FPA 不适合进行快速成像。高结电阻问题影响了肖特基二极管探测器的应用^[26], 因此 FET THz 探测器成为了 THz FPA 的最佳选择之一。

1.3 FET THz 探测器

FET THz 探测器是近年来发展起来的一种探测频率连续可调的探测器。20 世纪 90 年代, Dyakonov M 和 Shur M 开创性的理论工作^[30]预测, FET 的沟道可以充当等离子体波的谐振器。非对称 FET 沟道中的稳定电流会导致等离子体波的不稳定和自发产生。这又会导致以等离子体波频率及其谐波发射电磁辐射。随后, 他们又开展了另一项工作^[31], 表明 FET 沟道中二维等离子体的非线性特性可用于检测和混合 THz 辐射^[10]。

Dyakonov M 和 Shur M 的理论^[30]表明, 当 FET 沟道中载流子的迁移率足够大时, 在渡越时间内几乎不与质子或杂质发生碰撞, 载流子的运动可类比于浅水波, 表现为一种等离子体波的形式, 其振荡频率可由栅极控制。在

沟道长度达到亚微米量级的条件下, 等离子体波到达器件边界时会产生反射, 使载流子的运动不稳定, 进而产生频率在 THz 波段的振荡^[32]。等离子体波在沟道中的传播速度远大于载流子漂移速度, FET 将可以探测比晶体管截止频率更高的电磁波。

通过控制器件的栅长和栅电压就可以调节等离子体波的振荡频率。当外界入射的 THz 波的频率大于或等于等离子体波的振荡频率时, 在一定边界条件下就可以在源漏极之间产生恒定的光电流或光电压, 从而实现探测 THz 辐射的目的。

根据情况的不同, 又可分为共振探测和非共振探测。共振探测的实现^[33-35]受限于相对苛刻的制备工艺和工作条件, 一般需要极低温以及极短的栅长。在共振探测模式下, 器件输出的响应产生的峰值由多个谐振峰值组成, 峰值的位置在等离子体波基频以及基频的奇数倍^[32]。

与之相对的是非共振探测模式。在这种模式下, 器件可以在室温工作, 器件的栅长尺寸也可以较大。在非共振探测时, 器件的响应度随栅压的变化而变化, 在阈值电压附近器件的响应度达到最大值。这种模式下, 器件的探测带宽较宽, 没有明显的共振峰, 非常适合进行室温成像。目前, 非共振状态下的室温 THz 探测器在 THz 成像领域被广泛使用。

由于 THz 辐射的波长远大于晶体管的典型尺寸, 所以需要天线元件来辅助耦合空间中的 THz 波。如果没有天线, 仅通过接触垫和导线连接以不受控制的方式引导至栅极^[36-37], 探测器的响应度会较低, 噪声性能较差。常见的平面天线结构有偶极子天线、贴片天线、缝隙天线等。偶极子天线是在无线通信中使用最早、结构最简单、应用最广泛的天线之一, 应用在 THz 探测方面能取得很好的效果^[38]。目前常用的平面偶极子天线包括蝶形天线^[39-40]、对数周期天线^[15]和螺旋天线。贴片天线^[16, 41]由带导体接地板的介质基片上贴加导体薄片形

成, 接地板可有效消除衬底效应的影响, 但带宽极窄。

此外, 已有研究表明^[42], 透镜与探测器集成可以有效提高辐射耦合效率, 通过将 THz 波聚焦到探测器的有源区域来极大地提高天线效率, 从而提高灵敏度和降低 NEP。硅透镜结构示意图如图 4 所示。

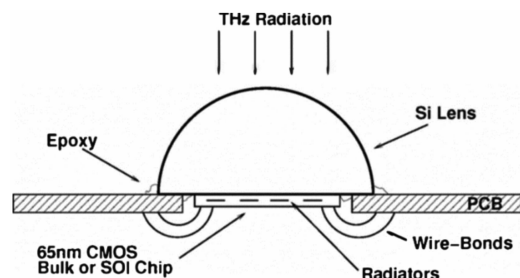


图 4 与 THz 探测器集成的硅透镜^[42]

2 FET THz 探测器的成像

下面根据探测器所用材料分类来分别介绍一些已有的应用在成像领域的 FET THz 探测器。

2.1 III-V 族材料

在 THz 探测器中, 常见的 III-V 族材料有 GaAs、GaN 和 InP。在 Dyakonov M 和 Shur M 提出开创性的理论工作后, 1997 年首次提出了利用二维电子对检测 THz 辐射的 GaN HEMT 器件^[43], 论证了理论的正确性。这是世界上第一个 FET THz 探测器。1998 年, Lu J Q 等人首次实现了工作在 2.5 THz 下的 GaAs HEMT THz 探测器^[33]。这一工作表明了开发在 THz 频率下运行的等离子体波器件的潜力。

2008 年, Lisauskas A 等人首次报道了 FET 在 THz 成像中的应用^[36]。探测器基于 250 nm GaAs 高电子迁移率晶体管 (High Electron Mobility Transistor, HEMT), 无特殊天线, 辐射通过接触垫和导线以不受控的方式引导至栅极。器件实现了 0.322 V/W 的最大响应度和 28.7 nW/Hz^{1/2} 的最小 NEP。他们演示了在 0.6 THz 下的成像, 如图 5 所示。同年, El Fatimy A 等人报道了第一个使用脉冲时域

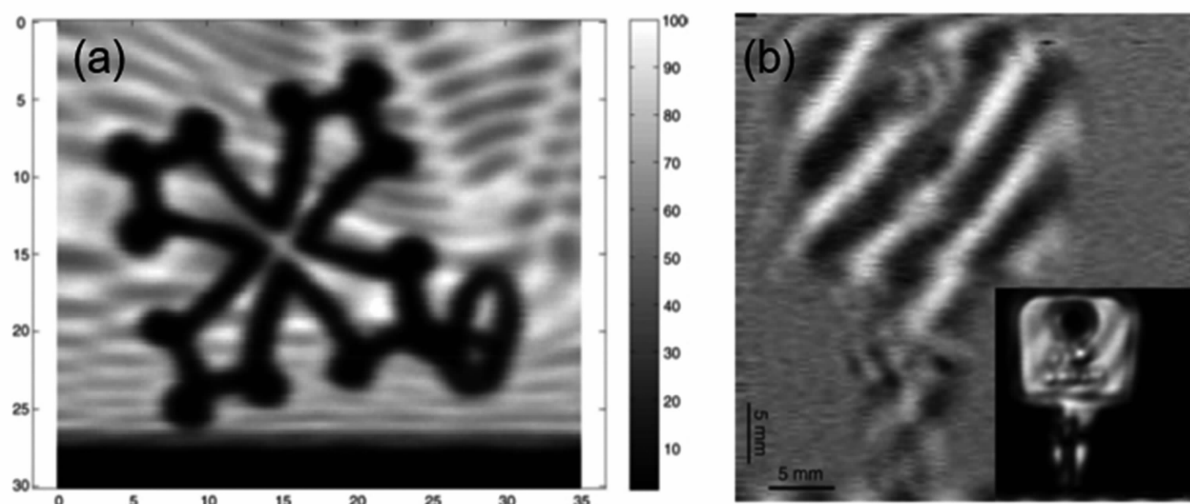


图 5 0.6 THz 下的成像结果: (a) THz 透射图像; (b) 反射图像^[36]

设置和等离子体波共振检测的室温 THz 成像系统^[44]。他们施加恒定的漏极偏压以便在室温下得到足够大的响应度, 从而获得高质量的图像。

2009 年, Nadar S 等人首次利用 GaAs/AlGaAs 基 HEMT 在高于 1 THz 的频率范围内获得了被测物体的图像^[45]。成像在 1.63 THz 频率下进行, 以光栅扫描的方式得到了 60×60 像素的图像。实验证明了场效应管是频率高于 1 THz 的快速视频室温 THz 成像的重要候选器件。

III-V 族 HEMT 因其高电子迁移率等材料优势在共振和非共振 THz 检测方面具有巨大潜力。但受工艺限制, 基于 III-V 族材料的 FET FPA 制造困难, 相关报道较少。针对 FPA 成像技术, 美国 Terasense 公司率先通过单像元拼接的方式, 实现了基于 GaAs FET 的 32×32 和 64×64 FPA 成像模组^[28]。但由于采用印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)极放大电路和像元拼接的方式, 像元分辨率和一致性较差。

2018 年, 罗木昌等人通过 THz 阵列探测器芯片和专用 CMOS 读出电路倒装互联集成, 实现了一种基于 AlGaN/GaN 场效应自混频的 32×32 THz FPA 成像传感器^[28]。他们利用该传感器演示了 THz 光斑、THz 干涉环以及

THz 光照下旋转塑料叶片的视频成像(帧频达到 30 Hz)。通过集成电压增益为 500 的像元放大电路, 平均响应度可以达到 217.6 kV/W, 平均 NEP 小于 $100 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 。

此外, 基于 InP 的 HEMT THz 探测器在过去几十年得到了较多的研究^[46], 并被证明是一种具有极高灵敏度的 THz 探测器^[47]。2011 年, Watanabe T 等人提出了一种基于 InP HEMTs 的器件。该器件可在 0.3 THz 波段实现高灵敏度的 THz 成像^[46], 最大响应度可达 26.1 V/W。

近几年用于 THz 成像领域的 THz 探测器(III-V 族材料)的详细性能比较见表 2。基于 III-V 族材料的 THz 探测器因其高击穿电压、高电子迁移率、高饱和速度、高电子密度等材料优势在 THz 检测方面拥有巨大潜力。由于具有较高的灵敏度和响应速度, 该探测器非常适用于高频率的 THz 波段探测。但 III-V 族半导体工艺发展较晚, 相关代工企业较少, 读出电路很难制备在同一块 III-V 族芯片上, 导致基于 III-V 族材料的 THz 探测器在集成度、成本、小型化等方面远不如 CMOS THz 探测器。因此, 如何利用 III-V 族化合物半导体的特性和 CMOS 读出电路优势, 研制具备更高性能的 THz FPA 成像传感器是实现可实用焦平面成像技术的关键。

表 2 基于 III-V 族材料的 THz 探测器的性能比较

年代	器件类型	工作温度	频率	天线	响应度/ (V·W ⁻¹)	NEP/ (pW·Hz ^{-1/2})	像素	有无透镜	帧率/ fps	引用
2008	250 nm GaAs HEMT	室温	600 GHz	—	0.322	37300	1	—	扫描	[36]
2010	250 nm GaAs HEMT	室温	1.63 THz, 2.54 THz	—	0.008 @1.63 THz	10000 @1.63 THz	1	—	扫描	[71]
2011	GaAs HEMT	室温	1 THz	对数周期天线	—	10000	1	—	—	[26]
2011	InP HEMT	室温	0.3 THz	—	26.1	—	1	—	扫描	[46]
2017	GaN HEMT	室温	291 GHz	—	—	860	1	—	扫描	[72]
2017	AlGaIn/GaN HEMT	77 K	900 GHz	偶极子天线	—	1	1	硅透镜	扫描	[73]
2018	GaN/AlGaIn HEMT	室温	900 GHz	三级子蝶形天线	1050	47	1	—	扫描	[39]
2018	GaN/AlGaIn HEMT	室温	900 GHz	—	217600	100	32×32	—	30 Hz	[28]
2018	GaN HEMT	室温	300 GHz	—	60	11	1	—	扫描	[74]
2019	100 nm AlGaIn/GaN HEMT	室温	490~650 GHz	蝶形天线	104 mA/W	26	1	硅透镜	扫描	[40]
2020	AlGaIn/GaN HEMT	300 K, 77 K	700~900 GHz	偶极子天线	5.7 A/W @77 K 203 mA/W @300 K	0.3 @77 K 4.5 @300 K	1	硅透镜	扫描	[75]
2021	AlGaIn/GaN HEMT	室温	100 GHz~2 THz	蝶形天线	—	57 @500 GHz	12×12	—	100	[76]
2022	AlGaIn/GaN HEMT	77 K, 300 K	340 GHz	偶极子天线	687000 @77 K 167000 @300 K	19.4 @77 K 45.1 @300 K	32×32	硅透镜	—	[70]
2023	InGaAs/AlGaAs HEMT	室温	800 GHz	对数周期天线	5200	30	1	硅透镜	扫描	[38]

(未完待续)