

太赫兹新型探测器的研究进展及应用

张玉平¹, 唐利斌^{1*}, 刘玉菲², Kar Seng Teng^{3*}, 吴刚¹, 胡伟达⁴, 韩福忠¹

(1. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223;

2. 重庆大学, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

3. 斯旺西大学工程学院, 英国 斯旺西 SA1 8EN;

4. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:太赫兹波由于其独特的光学和电学性质,在物理学、生物学、公共安全检测、局域通信、信息安全、环境监测、无损检测和国防科技等民用或军事领域都有着广阔的应用前景。太赫兹探测器作为太赫兹领域的核心器件,在太赫兹系统中扮演着重要角色。因此太赫兹探测器的性能,决定了太赫兹系统的应用市场。近年来,太赫兹探测器的发展已取得突破性的成果,但是太赫兹探测器还存在着一些普遍的问题,制冷的大赫兹探测器虽然有响应速率快和噪声等效功率低等优点,但是其紧凑性不好,并且成本较高。室温可工作的大赫兹探测器虽然不需要制冷环境,但是噪声等效功率偏大,灵敏度也不高。该综述从太赫兹探测器的制备材料和器件形式等方面,阐述了太赫兹探测器的发展现状及其应用领域。

关键词:太赫兹探测器; 材料; 研究进展; 应用现状

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A

The research progress and application of novel terahertz detectors

ZHANG Yu-Ping¹, TANG Li-Bin^{1*}, LIU Yu-Fei², Teng Kar Seng^{3*}, WU Gang¹, HU Wei-Da⁴,
HAN Fu-Zhong¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Chongqing University, Chongqing 400044, China, 3. College of Engineering, Swansea University, Swansea SA1 8EN, United Kingdom, 4. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Terahertz waves have many unique electrical and optical properties, which have significant applications in both civil and military fields, such as physics, biology, public safety inspection, local area communication, information security, environmental monitoring, non-destructive testing and defense technology etc. Terahertz detector is one of the core components in a terahertz system. Therefore, its application is usually determined by the characteristic and performance of the detector. In recent years, there are some major breakthroughs in the development of terahertz detectors. However, there are still technology challenges that limit the application of such device. For example, room temperature terahertz detectors exhibited a large noise equivalent power and low sensitivity. This is in contrast to cooled terahertz detectors, which demonstrated high response rate and low noise equivalent power, but they cannot be miniaturized and are costly. This paper provides a summary and discussion on the recent development and application of terahertz detectors from the aspect of material preparation and device configuration.

Key words: terahertz detectors, materials, research progress, application status

PACS: 71. 10. Ca, 78. 20. -e, 81. 05. Ea

收稿日期: 2019-03-03, 修回日期: 2020-02-17

Received date: 2019-03-03. Revised date: 2020-02-17

基金项目: 预研项目(1422030209), 创新团队项目(2017CX024), 国家重点研发计划(2016YFE0125200, 2016YFC0101100)

Foundation items: Supported by Pre-research Fund (1422030209), the Innovation Team Program of NORINCO Group (2017CX024), the National Key Research and Development Program of China (2016YFE0125200, 2016YFC0101100)

作者简介(Biography): 张玉平(1993-), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生。主要从事光电材料与器件研究。E-mail: kipzyp@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: scitang@163.com; k. s. teng@swansea. ac. uk

引言

太赫兹波是位于红外和微波之间,频率为0.1~10 THz,波长为30~3 000 μm 的电磁波波段,其在电磁波谱的位置如图1所示。人们发现太赫兹波的时间比较早,但是由于早期缺乏稳定性好和可靠性高的太赫兹辐射源,太赫兹技术的发展受到了很大的限制。导致人们对太赫兹波段的了解比较少,因此,太赫兹波段一度被称为电磁波谱的“间隙”^[1-2]。20世纪80年代以来,随着超快电子学技术、激光技术和半导体技术等技术的发展,对太赫兹技术的研究取得了突破性的进展^[3]。由于太赫兹波独特的光学和电学特性,太赫兹技术在天体物理学、生物医学、无损检测、保密通信、爆炸物检测、人体安检、火灾监测和国防安全等领域具有广阔的应用前景。太赫兹技术巨大的应用前景使其在未来的高新技术发展中,具有重要的战略意义。为了在未来的国际高新技术竞争中抢占一席之地,各国政府对太赫兹技术的发展高度重视。2004年,美国把太赫兹技术誉为“改变未来的十大技术”之一^[3]。2005年,日本在十年科技战略规划中,把太赫兹技术列为“未来十项重大支柱技术首位”。我国对太赫兹技术的研究起步较晚,2005年,刘盛纲院士作为执行主席主持召开了以“太赫兹科学技术的新进展”为主题的香山会议,明确地提出了把发展太赫兹技术列为战略需求,国内对太赫兹技术的研究由此拉开序幕。

太赫兹辐射源和太赫兹探测器是太赫兹系统的核心,长期以来,国内外关于太赫兹技术的研究,主要是关于太赫兹辐射源和太赫兹探测器的研究^[4-5]。太赫兹辐射源是太赫兹波的产生装置,也是推动太赫兹探测技术发展的动力源。为了满足太赫兹技术的发展需求,太赫兹辐射源需要满足稳定性好、功率高和紧凑性好等性能;太赫兹探测器则需要满足灵敏度高、响应速度快、噪声等效功率低、紧凑型、探测频带宽和室温工作等性能。近几年来,关于稳定的高功率太赫兹辐射源的研发已经取得一些进展,例如,GaN量子级联激光器太赫兹辐射源已经可以达到5~12 THz的宽频率范围^[6]。同时,推动了太赫兹探测器的发展。随着太赫兹辐射源技术的日益成熟,太赫兹探测器有了更好的发展平台;在太赫兹技术广阔的市场应用前景的推动下,太赫兹探测器有了更好的发展机遇;但同时也增加了对高性能太赫兹探测器的需求,所以提高太赫兹

探测器的综合性能是太赫兹探测器的发展方向。然而,相对于红外探测器和紫外探测器来说,提高太赫兹探测器的综合性能还存在很多的挑战,这主要是由于太赫兹波在电磁波中的特殊位置,使得太赫兹探测技术处于一个交叉的前沿领域。长波方向涉及电子学的领域,而短波方向则涉及光子学领域,这种电子学与光子学的交叉性,使得在解决太赫兹相关问题时,不能简单的只从电子学或是光子学的角度分析,必须同时兼顾两者,这极大地增加了提高太赫兹探测器综合性能的难度。目前,制冷型的太赫兹探测器具有灵敏度高和噪声等效功率低等优点,但因为需要制冷条件,其成本较高,且紧凑性不好,因而在一定程度上限制了其应用。室温可工作的太赫兹探测器虽然没有了制冷条件的限制,但其灵敏度还有待提高。为了扩展太赫兹探测器的应用范围,必须发展既能室温工作,又具有高灵敏度、宽探测频带、低噪声等效功率、高集成度的高综合性能的太赫兹探测器。通常探测器的光敏材料和器件结构是影响其性能的关键因素,所以本综述主要从太赫兹探测器的制备材料和器件结构方面阐述太赫兹探测器的发展现状及其巨大的市场应用前景。从而在一定程度上,为制备高性能太赫兹探测器提供一个初步的器件材料和结构的选择思路。

1 太赫兹探测器发展现状

近三十年,太赫兹探测器发展迅速,其种类越来越多样化。然而器件的发展离不开材料的发展,要制备高性能的太赫兹探测器,首先需要选择合适的材料。如图2所示,制备器件的材料性能越好,其制备技术越成熟,这个材料体系就越丰富,对于材料的可选择性也就越高,就有可能制备出更多高性能的探测器。随着纳米技术等技术的发展,制备太赫兹探测器的材料,由传统材料向各种具有优异性质的新型材料发展,如具有高载流子迁移率的石墨烯材料以及其它新型二维材料等。此外,太赫兹探测器的性能还与其器件形式密不可分。在太赫兹探测器的发展过程中,太赫兹探测器的器件结构也在经历由简到繁的变化,从最开始的高莱探测器到各种带集成天线的光伏型探测器,太赫兹探测器的性能和集成度都有了很大的提高。以下部分将详细介绍太赫兹探测器的制备材料及器件形式。

1.1 太赫兹探测器的探测机理

随着太赫兹技术的发展,太赫兹探测器的种类

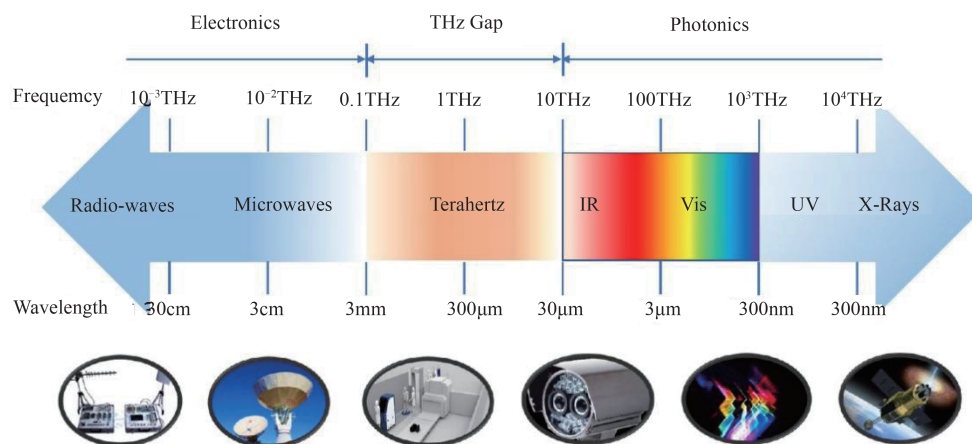


图1 电磁波频谱分布图

Fig. 1 Spectrum distribution of electromagnetic waves

趋于多样化。现在最常用的分类方式是太赫兹探测器划分为:相干探测器和非相干探测器,其中非相干探测器也叫作直接探测器^[7]。相干探测器是指能同时探测信号的幅度和相位信息的探测器,通常用于需要较高的频谱分辨率的探测。目前,相干探测主要是外差探测。虽然相干探测的灵敏度远大于直接探测,但由于受到本振信号的限制,难以进行大规模的阵列集成。这种外差式太赫兹探测器是通过将太赫兹信号与本振信号外差混频至一个中间频率,再把这个中间频率信号进行放大从而实现对太赫兹信号的探测。相干探测的核心技术是具有非线性 $I-V$ 特性的混频器,考虑到混频效率和噪声的因素,现在主要的混频器有肖特基二极管混频器和超导体-绝缘体-超导体隧道结混频器。非相干探测器只能对信号的幅度进行测量,得不到信号的相位信息。与相干探测器相比,非相干探测器没有受到混频器的限制,所以其可探测的波段较宽,但由于其灵敏度没有相干探测器的高,主要用于中低频谱分辨率探测。非相干探测器又可分为制冷型探测器和非制冷型探测器,非制冷型探测器也叫室温可工作的探测器。高莱探测器(Golay cell)、热释电探测器(Pyroelectric)和测辐射热计(Bolometer)等非制冷探测器可以在室温工作,此类探测器的灵敏适中,等效噪声功率一般在 $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{ W/Hz}^{1/2}$,但是其探测的波谱范围较宽。低温工作的半导体直接探测器,如非本征Ge光电型探测器和量子阱探测器等^[8],噪声等效功率可达 $10^{-17} \sim 10^{-13} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 。与非制冷型探测器相比,制冷型探测器的灵敏度一般较高,且响应速度快。但是制冷型的探测器的成本比较高,而且由于制冷条件的限

制,其体积较大,不利于发展紧凑型的探测器。为了降低太赫兹探测器的制备成本,提升其紧凑性,需要发展非制冷型的高性能器件。

直接探测器按照探测原理又可以分为热探测器和光子探测器^[9],热探测器的探测原理主要是把吸收的太赫兹辐射能转变为探测元件的电学性质或物理性质。热释电探测器就是热探测器,当有太赫兹辐射,具有热释电效应的晶体的电阻会发生变化,从而反映出太赫兹辐射的强度。热探测出现的时间最早,结构也相对简单,探测的波谱范围没有较强的选择性,但是灵敏度不高。光子探测器主要是通过接收太赫兹能量改变探测器内原子或分子的内部电子状态,由光电效应转变为可测量的电信号,再把这个信号放大来实现对太赫兹波的探测。光子探测器主要是光电导型和光伏型探测器,光电导探测主要是单光子探测,由于热的传递速率小于电信号的传输速率,所以与热探测相比,光电导探测器具有较高的响应率。但是光电导探测器一个大的问题是其暗电流比较大,这不利于提高探测器的响应率和探测率。而光伏型器件就可以在某种程度上解决器件暗电流过大的问题,光伏型探测器通常有一个界面电场,这个电场可以由结型器件的内电场产生,也可以由外加电场产生。在这个界面电场的作用下,暗电流在一定程度上可以得到有效的抑制,并且界面电场的存在也有利于光生载流子的快速分离,从而提高探测器的响应速率。因此,光伏型器件形式是制备高综合性能的太赫兹探测器的一个很好的选择。近年来,场效应晶体管形式的太赫兹探测器由于其优异的光电性能,使其成为研究较为广泛的一种光伏型太赫兹探测器。太赫

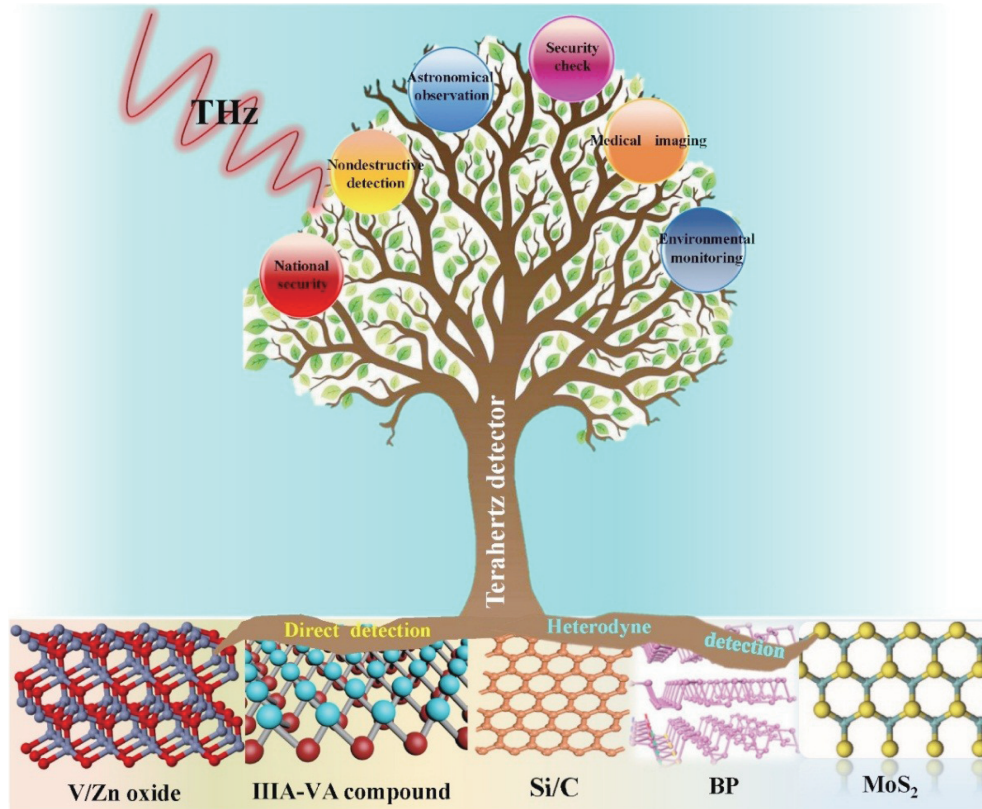


图2 太赫兹探测器体系图

Fig. 2 The system diagram of terahertz detectors

兹探测器的这四种主要探测机理示意图如图3所示,探测机理如下文所述^[10]。

1) 外差探测

外差探测利用非线性 $I-V$ 特性^[11], 因此其输出包含中频 (IF) $V_{IF} = |V_{RF} - V_{LO}|$ 的分量^[12]。只要本振信号 (LO) 稳定, 该组件就会保留原始信号的频谱和相位信息。因此, 该探测机理主要是通过把射频检测信号 (V_{RF}) 与附近频率处的本振信号 (V_{LO}) 混合来实现对太赫兹信号的探测。由于外差探测的频谱分辨率较高, 且具有很高的灵敏度, 外差式探测被广泛应用于太赫兹实域光谱成像领域^[13]。此外, 外差探测具有高频选择性, 对于电子学, 这意味着可以非常有效地使用给定的频带, 即可以在其中安装许多传输信号通道; 对于光谱学, 这意味着可以实现高光谱分辨率。此外, 外差探测的探测范围较窄, 则可以通过选择类似于窄信号的检测带宽来降低噪声^[14]。

2) 热探测

太赫兹波段中使用的热探测器起源于长波红外和远红外区域, 包括高莱探测器、测辐射热计和热释电探测器^[15]。太赫兹辐射被探测器的吸收层

吸收后产生热量, 热量的变化再导致探测材料产生一些可测量的物理变化, 利用这个物理变化来实现对太赫兹的探测。在热探测过程中, 因为吸收材料的热量变化需要一定的时间, 所以热探测器的一个普遍特征就是其响应速度通常相对较慢。然而对于一些特殊的超导和半导体热探测器而言, 其响应速度较快, 但其成本较高^[16]。热探测的一个优势是只要有太赫兹辐射照射到吸收层上, 就会产生热量, 所以热探测器通常可以探测较宽的光谱范围。

3) 光电导探测

在光电导探测器中, 它们对单个光子有响应^[17]。在太赫兹频率下, 光子能量很小, 这通常对应于浅杂质状态与半导体中的导带或价带之间的能隙^[18]。当光子能量大于半导体的带隙时, 电子和空穴被光子撞击而激发, 引起的电导率变化被称为固有激发。如果光子没有足够的能量来克服间隙能量, 则仍然可以通过向半导体中添加杂质来引起光电导过程。这些过程可以产生非常接近导带或价带的施主或受主状态, 并且低能量光子可以将电子激发出施主状态或进入受主状态。与热探测相比, 光电导探测的响应速度很快, 但是它们在光子

能量变得小于杂质态的电离能的频率处具有急剧的响应截止,因此,光电导探测器的探测带宽有限^[19]。

4) 光伏探测

光伏型太赫兹探测器主要基于光生伏特效应,这种探测器也叫势垒型光电探测器。当器件吸收太赫兹辐射时,会激发出光生载流子,并注入到势垒附近,从而形成光生电压。场效应晶体管形式的器件作为一种典型的光伏器件,在太赫兹探测器的研究中被广泛研究。场效应晶体管(FET)太赫兹光电探测器利用等离子体共振原理来产生光生电压,从而实现对太赫兹信号的探测。当载流子迁移率足够高时,太赫兹频率的短沟道场效应晶体管的动态特性由等离子体波控制。这种等离子体的集体振荡可以在具有反向偏置肖特基结的二维电子通道和具有周期性光栅栅极的双量子阱场效应晶体管中观察到。在流体动力学近似中^[20],二维电子气(2DEG)中的等离子体模式频率可表示为 ω_0 ,其值如式(1)所示:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{e(V_g - V_{th})}{m}} \quad , \quad (1)$$

其中 L 指的栅极长度, V_g 指栅极电压, V_{th} 指阈值电压, m 指的是电子有效质量^[12]。由于场效应晶体管探测器依赖于电子气的集体振荡,可以为发展高

性能室温太赫兹探测提供新的方法。场效应晶体管中二维等离子体振荡的谐振频率随着沟道尺寸的减小而增加,并且亚微米栅极长度的谐振频率可达到太赫兹范围。场效应晶体管可以用于谐振(调谐到特定波长)和非谐振(宽带)太赫兹探测,并且可以通过改变栅极电压直接调谐。此外,栅电压调控电子通道的寄生电容对截止频率和灵敏度的影响较小,因而可以发展高灵敏度的宽频太赫兹探测器。

1.2 制备材料

传统的太赫兹探测器的材料,主要基于ⅢA-V A族和ⅣA族的半导体材料^[3,21-27]。光电导探测器一般使用一些低温生长材料,如GaAs和InP等^[3,23];测辐射热计的材料主要是InSb, Si和Ge;热释电探测器则用的是晶体具有热释电性的材料,如LiTaO₃, LiNbO₃, DTGS(氘化硫酸三甘肽)等^[8,28-31]。近年来,随着材料制备技术的成熟,一些具有优异光电性质的新型材料也被应用于太赫兹探测器的制备,如一维碳纳米管、石墨烯、过渡金属二硫化物、黑磷、拓扑绝缘体材料和一些其他的二维材料^[1,32-34]。

碳纳米管是一种典型的一维材料,自从1991年被发现以来,碳纳米管在光电子探测和生物传感等领域的应用前景引起了广泛的关注^[35-36]。碳纳米管按照其结构可以分为单壁碳纳米管、双壁碳纳米管

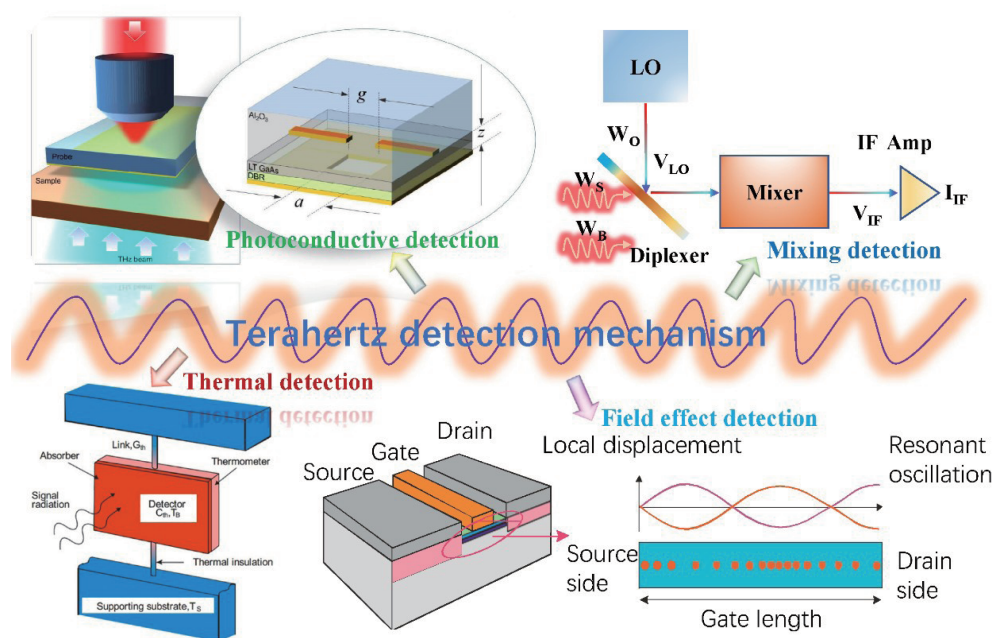


图3 太赫兹探测器探测机理图^[12,16,18]

Fig. 3 Schematic diagrams illustrating the mechanism of terahertz detectors^[12,16,18]

和多壁碳纳米管。碳纳米管在制备高频室温太赫兹探测器方面具有广阔的应用前景主要因为:碳纳米管具有很大的比表面积以及高的载流子迁移率($10\ 000\sim 50\ 000\ \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)和热稳定性;碳纳米管具有大的电子平均自由程,且其器件的开关频率位于太赫兹范围;由碳纳米管排列而成的碳纳米管薄膜也具有独特的物理和化学性质。然而在发展基于碳纳米管的高性能太赫兹探测器还存在一个亟待解决的技术难题,就是很难制备具有高度单一取向性的碳纳米管阵列。

石墨烯在室温下也具有很高的载流子迁移率,可以用于制备快速响应的室温光电探测器。此外,石墨烯零带隙的能带结构,使其非常适合于作为宽频带太赫兹探测器的光敏材料。目前,单层石墨烯、双层石墨烯和多层石墨烯都应用在了太赫兹探测器的制备上,并且也展现出了良好的室温可工作性能。2012年,L. Vicarelli等人制备了第一个可在室温0.3 THz工作的石墨烯太赫兹探测器,揭示了石墨烯在室温工作、快速响应的太赫兹探测器的应用前景^[37]。2016年,苏州纳米所秦华团队也制备出了可室温工作的石墨烯场效应晶体管太赫兹探测器,其响应度达到30 V/W,噪声等效功率为51 pW/Hz^{1/2},这是我国在太赫兹探测器领域所取得的又一个成果^[38]。然而,虽然基于石墨烯的光电探测器具有很宽的探测波段,但是石墨烯的结构特性也限制了探测器的响应率。为了解决石墨烯光电探测响应率低的问题,广大学者做了许多研究,主要是从器件结构和材料方面来提高器件响应率。在器件结构上,主要是通过天线来增强对太赫兹波的吸收^[39-40]。在器件材料上,可以通过改善石墨烯的结构特性来提高响应率,2019年,Chen Meng等人研究了通过三维微孔结构的石墨烯提高探测器的灵敏度,为解决石墨烯响应率低的问题开拓了一个新的思路^[41]。此外,还可以把石墨烯与其它材料复合来提高响应率,如零维量子点和过渡金属二硫化物。

过渡金属二硫化物(TMDs)是一种新型的半导体材料,材料的层与层之间通过范德华力结合。TMDs具有高的载流子迁移率($34\ 000\ \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)和强的非线性光学响应特性^[34],并且容易通过范德瓦尔斯相互作用与其他材料结合。如MoS₂和MoSe₂二维材料的直接带隙在0.4~2.3 eV,可以很好的与石墨烯互补^[42],并且它们的带隙也可调,在发展高性

能的太赫兹探测器方面具有很大前景。2016年,用CVD法生长的MoSe₂被用于太赫兹光电探测器^[34]。在室温下,该探测器的响应度为38 mV/W,噪声等效功率小于 $6.6\times 10^6\ \text{W}/\text{Hz}^{1/2}$,表明MoSe₂可以用于室温太赫兹探测,但其响应率还有待提高。Docherty等人报道了MoS₂的响应速度可达350 fs,并指出MoS₂适合应用于高频(>1 THz)领域。Deng等人报道了单层MoS₂对太赫兹波的吸收率接近5%,高于单层石墨烯的吸收率^[43]。Liu等人基于单层MoS₂的太赫兹探测器,揭示了其在太赫兹探测的应用前景^[34]。因此,研究基于TMDs的高性能太赫兹探测器是一个有很大前景的方向。

黑磷(BP)是一种类石墨烯二维材料,其带隙大于石墨烯,六角分布的磷原子排列成非平面的褶皱结构,这种特殊的原子结构使其产生固有的面内各向异性,导致黑磷具有独特的角度依赖导电性,且在可见光到近红外的范围内存在固有的光学各向异性^[44]。块体黑磷有一个0.3 eV的直接带隙,当黑磷由块体变为层材料时,由于量子限域效应,其带隙会随着层数的减少而增大,单层黑磷的带隙可达1.0 eV。通过层数调节黑磷的带隙便可以实现一个宽频率范围的探测,因而使其在太赫兹探测领域具有很大的应用前景。此外,黑磷室温下的载流子迁移率大于 $1000\ \text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,且黑磷容易与其它材料集成,因而有利于发展高性能的室温太赫兹探测器^[45]。2015年,Leonardo Viti等人首次报道了基于黑磷的太赫兹探测器,最大响应度为0.15 V/W。研究指出双层黑磷场效应晶体管器件的响应度和双层石墨烯场效应晶体管的器件不一样,基于双层黑磷器件的响应度不受带间迁移和固有噪声的影响^[42]。随后基于黑磷的异质结和场效应晶体管形式的器件均有报道,展现了黑磷在室温太赫兹探测领域的应用前景^[45]。

拓扑绝缘体材料不同于传统绝缘体和金属,其内部是绝缘体,表面受时间反演对称性保护的金属态。这种表面态由体电子态的拓扑性质决定,不易受到体系中缺陷和杂质的影响,因此,电子能有序的通过在拓扑绝缘体的通道,彼此之间没有碰撞,也没有能量的损失^[46]。拓扑绝缘体的表面态还使其具有一个特殊的能带结构。对于传统的绝缘体,材料的费米能级处于导带和价带之间,材料存在着一个大的带隙。而拓扑绝缘体在能级结构上,这些表面态就像桥梁一样把价带和导带连接起来,并且

这种能级结构是由能带结构的拓扑性质所决定的,受到时间反演对称性的保护,不受杂质或缺陷的影响,因此,具有很好的稳定性^[47]。拓扑绝缘体特殊的能带结构使得其具有很好的光学性能,拓扑绝缘体的吸收光谱的响应区间非常大^[48],在 800~2000 nm 的波段,甚至在太赫兹波段都有响应。此外,通过把拓扑绝缘材料和其它材料复合,实现材料性能的互补,从而制备出更高性能的器件。拓扑绝缘体的这些特性使其在实现从紫外到太赫兹的宽波段

探测方面具有广阔的前景, Yang Jie 等人制备了一个基于拓扑绝缘体 SnTe 的高响应率探测器,其光谱响应在 254~4650 nm, 虽然还未能探测太赫兹波段,但揭示了其在太赫兹探测领域的应用前景^[49]。拓扑绝缘体材料在高性能太赫兹探测器的应用中还需要进一步的研究,这是低功耗、高性能太赫兹探测器发展的一个新的方向。太赫兹技术的发展过程中,已形成了丰富的材料体系,表 1 所示为典型的太赫兹探测器制备材料。

表 1 太赫兹探测器制备材料

Table 1 List of materials for terahertz detectors

Material	Material characteristics	Form of detector	Detector characteristics	Ref.
GaAs	Low temperature growth, high electron mobility, high carrier density	Photoconductive antenna, Schottky diode, field effect transistor	Cooling, high sensitivity	[3,21-26]
GaN	Large band gap, strong polarization effect, high electron density	Field effect transistor	Room temperature, respond quickly	[24,50-51]
InP	Low temperature growth	Schottky diode, field effect transistor	Cooling, high sensitivity	[3,23]
NbN	High resistance temperature absorption, strong absorption of terahertz waves	Bolometer, superconducting tunnel junction	High sensitivity	[52-54]
InN	High carrier drift velocity, low interval scattering rate	Nanowire field effect transistor	Room temperature, high sensitivity	[55]
GaP	Nonlinear optical properties	Hybrid waveguide detection	Room temperature, high sensitivity	[56]
Si	Mature preparation process	Bolometer, field effect transistor	Room temperature	[57-58]
Bi	Low residual stress, high thermal expansion coefficient	Field effect transistor	Wide spectrum range	[59]
VO _x	High resistivity and temperature coefficient of resistance, low noise	Bolometer	Wide spectrum range, high sensitivity	[60-62]
Carbon nanotubes	Narrow band gap, high carrier mobility	Field effect transistor	Room temperature, high sensitivity, wide spectrum range, compact	[1,32,38]
ZnO	High UV and visible light transmission, high near-infrared reflection, forbidden bandwidth, high mobility	Nanowire field effect transistor	Room temperature	[63-64]
AlGaAs	Easy to form a heterojunction with GaAs	quantum well, heterojunction field effect transistor	Room temperature, high response rate	[22,25-26,65-66]
InGaAs	High carrier mobility	Schottky diode	Room temperature, high response rate	[67-68]
InAs	High electron mobility value at room temperature, long electron mean free path	InAs nanowire field effect transistor	Wide spectrum range, room temperature	[69-70]
LiTaO ₃	Pyroelectricity, nonlinear optical performance, low dielectric constant, high Curie temperature	Pyroelectric	Low sensitivity, wide spectrum range	[28]
Graphene	High carrier mobility, zero band gap	Field effect transistor	Room temperature, compact, high sensitivity, narrow spectrum range	[1,27,37,71-73]
MoS ₂	High carrier mobility	Field effect transistor	Room temperature, high sensitivity	[34]
BP	High carrier mobility, band gap between graphene and MoS ₂	Field effect transistor	Room temperature, high sensitivity	[45]

1.3 太赫兹探测器器件形式

不同材料的性质往往是不同的,采用的探测原理可能也不同;相同的材料,通过不同器件形式所形成的太赫兹探测器的性能也是不同的。太赫兹探测器的器件形式是很多样化的,从最开始结构简单的高莱太赫兹探测器到现在的各种带耦合天线的太赫兹探测器。太赫兹探测器器件结构的发展,不仅丰富了制备太赫兹探测器的材料体系,也使得许多性能优异的新型材料得以运用在太赫兹探测器上,同时结构的改善也提升了太赫兹探测器的综合性能。如表2所示,列举了目前国内外几种比较典型的太赫兹探测器。其中的高莱太赫兹探测器,热释电探测器等已经实现商业化^[74],在国外的一些太赫兹公司可以买到,但是国内还未实现商业化量产。

高莱探测器、热释电探测器和测辐射热计探测器都可以探测比较宽的频率范围,而肖特基二极管和场效应晶体管形式的探测器探测的频率范围有限。如表2所示,场效应晶体管的太赫兹探测器的材料体系比较丰富,并且这种器件适合用于集成电路等微系统中。除此之外,场效应晶体管形式的太赫兹探测器的实现方式也是多样的,通过异质结和超晶格等形式都可以制作出场效应晶体管的太赫兹探测器,下面分别介绍这几种形式的探测器^[7]。

1) 电光晶体太赫兹探测器

电光晶体太赫兹探测器主要是利用电光晶体的电光效应来探测太赫兹波,其探测的机理为外差

探测。如图4(a)所示^[78],太赫兹辐射被光电导天线吸收后,形成太赫兹电场,这个太赫兹电场使GaP电光晶体的折射率发生改变,从而实现太赫兹波的探测^[2]。当外界的电场作用在晶体上时,晶体的折射率发生改变的效应就叫电光效应。晶体折射率和电场的关系满足: $n = n_0 + \gamma E + \chi E^2$,其中 n_0 为晶体的固有折射率, γ 为一次电光系数, χ 为二次电光系数。由于材料的特性不同,这两个系数对晶体的折射率影响也不一样^[2]。把电场的一次项占主导作用导致晶体的折射率改变叫作Pockels效应,也叫一阶电光效应。电场的二次项占主导作用时,则叫Kerr效应,也叫二阶电光效应。对于不同的电光晶体材料,其占主导作用的效应可能是不同的^[79]。常见的电光晶体有CdTe, ZnS, ZnSe, ZnTe, LiTaO₃, 和LiNbO₃等^[80-81]。在太赫兹探测领域,对ZnTe电光晶体的研究比较广泛,主要是因为ZnTe晶体一次电光系数($\gamma=4.04$ pm/V)和二次电光系数($\chi=1.6 \times 10^{-7}$ esu)的值均较大,且在800 nm的激光脉冲下具有很好的相位匹配^[82]。目前,限制电光晶体在太赫兹探测领域应用的因素主要是很难获得高质量的单晶。

2) 高莱太赫兹探测器

高莱是早期出现的一种带有气体空腔的热膨胀式太赫兹探测器,这个气体腔是通过一层薄膜封闭的。如图4(b)所示^[83],其探测原理很简单,当太赫兹辐射到气体腔内时,气体吸收了太赫兹辐射的能量,体积发生膨胀,从而导致封闭气体腔的薄膜

表2 太赫兹探测器的典型器件形式

Table 2 List of typical terahertz detectors and its characteristics

Detector	Materials	Characteristics	Ref.
Golay cell	-	Operating at room temperature, simple structure, susceptible to vibration, frequency bandwidth, typical NEP $\sim 10^{-10}$ cm/Hz ^{1/2}	[75]
Photoconductive	ZnTe, GaP, DAST	Short response time, detection frequency bandwidth, detection sensitivity and high signal-to-noise ratio, typical NEP $\sim 10^{-15}$ cm/Hz ^{1/2}	[3,8]
Pyroelectric	LiTaO ₃ , LiNbO ₃ , DTGS	Low sensitivity, simple structure, room temperature operation, low cost, detection modulation terahertz radiation or pulse radiation, detection frequency bandwidth, typical NEP $\sim 10^{-9}$ cm/Hz ^{1/2}	[8,28-31]
Bolometer	Vox, Bi, Si, Ge, NbN	High sensitivity, required cooling environment, large volume, high cost, detection frequency bandwidth, typical NEP $\sim 10^{-10}$ cm/Hz ^{1/2}	[52-54,75-76]
Schottky	GaAs, Si, InP	High sensitivity, fast response, low detection frequency (less than 1THz), room temperature operation, narrow detection frequency band, typical NEP $\sim 10^{-10}$ cm/Hz ^{1/2}	[8,56,77]
FET	GaAs, GaN, InP, NbN, GaP, Si, Bi, Carbon nanotubes, ZnO, Al-GaAs, InAs, Graphene, MoS ₂ , BP	Rich in materials, work at room temperature, diversified devices, easy to form arrays, minimum NEP $\sim 10^{-20}$ cm/Hz ^{1/2} (4.3K)	[1,24,32,42,50,51,53,55,57,60-61,63,69,71,75]

发生形变,通过测量薄膜的形变,即可实现对太赫兹波的测量。气体空腔内常使用的气体是一些稀有气体,如氩气和氙气,主要是因为这些单原子的气体热导率小,可以减少热量的损失。这种探测原理和热释电探测器相似,但是其灵敏度高于热释电探测器。主要是因为气体对太赫兹辐射的敏感程度大于热释电晶体对太赫兹辐射的敏感程度,高莱探测器的典型响应率值为 10^5 V/W^[84]。基于这种探测原理的高莱探测器是在室温下工作的,并且探测的频率范围比较宽,但它也有很大的缺点,周围环境的振动会对其产生很大的影响,因此,使用时通常需要采取一定的减震措置。

3)热释电太赫兹探测器

热释电太赫兹探测器就是通过晶体的热释电效应来探测太赫兹辐射的,所以其材料主要是具有热释电性的晶体。如图4(c)所示^[79],当太赫兹辐射到这类晶体上时,会引起晶体温度的变化,这个温度变化会导致晶体内部的载流子分布发生变化,从而在晶体两端形成一个电势差。电势差的变化情况不同,对应不同能量的太赫兹辐射。然而由于这种热释电效应产生的电势差是由于晶体温度差所引起的,当晶体的温度重新平衡以后,这个温度差就不再存在,电势差也随即消失,所以热释电太赫兹探测器只能探测被调制的太赫兹辐射或是脉冲太赫兹辐射。虽然这种热释电特性使其探测具有一定的局限性,并且灵敏度不高,但是热释电探测器具有结构简单、成本低、室温可工作和探测频带宽的性能^[29],可以很好地用于被动成像等领域^[28]。

4)测辐射热计太赫兹探测器

测辐射热计的最早应用其实就是一个安装在电桥中的热敏电阻,当太赫兹波辐射到这个热敏电阻上时热敏电阻会发生变化,通过电阻变化值来测量太赫兹辐射的强度,从而实现了太赫兹波的探测^[60]。经过多年的发展,测辐射热计太赫兹探测器的种类已经非常丰富,最常见的是半导体(掺杂的Si或Ge)测辐射热计,为了使其具有好的灵敏度,半导体类的测辐射热计通常工作在低温条件下^[85-86]。此外,还有一些基于金属材料及碳材料的测辐射热计,如图4(d)所示,这种金属测辐射热计可工作于制冷环境,也可以在室温下工作,但室温工作时灵敏度不高^[54]。随着探测器的应用需求的提高,室温可工作和高灵敏也是测辐射热计探测器发展的重要方向。为了发展室温可工作型的测辐射热计,基于

V_2O_5 的测辐射热计出现了。为了提高其灵敏度,基于Nb或NbN材料的超导和半导体形式的辐射热计出现了^[84],超导和半导体辐射热计对温度的变化很灵敏,很小的温度改变就可以造成明显的电阻变化^[76]。超导辐射热计的声子-电子制冷机制,极大的提高了其响应速度,弛豫时间为 $10^{-5} \sim 10^{-10}$ s。由于超导体材料的出现,测辐射热计不仅可以作为直接探测器,还可以作为外差探测器。工作在极低温(100~300 mK)下的超导辐射热测量计可以达到宇宙背景噪声极限 10^{-9} W/Hz^{1/2},这是目前具有最高灵敏度的探测器。但是高的灵敏度通常需要在制冷的条件下,制冷设备使得探测器的体积过大,造价成本也较高。在太赫兹成像领域,传统的探测器扫描有限,使太赫兹成像具有很大的局限性,为了解决这个问题,阵列式的辐射热计太赫兹探测器也出现了,这对探测器的紧凑性和均匀性也要求更高了。2017年,Andrey Timofeev等人提出了一种动力学电感辐射热计焦平面阵列的太赫兹探测器,不仅保持了探测器的高空间分辨率,还避免了光机扫描的缺点,促进了太赫兹成像领域的发展^[87]。在接下来的研究中,可以通过选择合适的测辐射热计探测器材料以及设计合适的器件结构,来发展既能在室温工作又具有高的灵敏度的测辐射热计太赫兹探测器。

5)肖特基二极管太赫兹探测器

肖特基二极管利用金属和半导体接触形成的肖特基结原理制成^[88],作为电子学传统器件,在太赫兹探测技术中使用广泛。肖特基势垒结构最开始是触丝型的,现在的主要是具有高集成度的平面结构。这个结构的优化,使得其频率上限和灵敏度提高很大。图4(e)所示为肖特基二极管的截面示意图^[89],它的结构比较简单,图4(f)所示是肖特基二极管太赫兹探测器的示意图^[79]。肖特基二极管太赫兹探测器的灵敏度高、响应率高,并且在室温下可工作,但是它的工作频率不高^[90],只能在1 THz范围内工作。因此,通过宽频集成天线来提高肖特基二极管太赫兹探测器的工作频率范围成为研究的重要方向^[91-92]。2013年,Sang-Pil Han等人提出基于InGaAs的肖特基二极管阵列太赫兹探测器,用于太赫兹实时成像^[68]。肖特基二极管阵列的形成是通过在阳极和阴极间分层堆放SiN_x,从而形成空气桥进而构成阵列。而且基于InGaAs的肖特基二极管与基于GaAs的肖特基二极管探测器相比,具有更

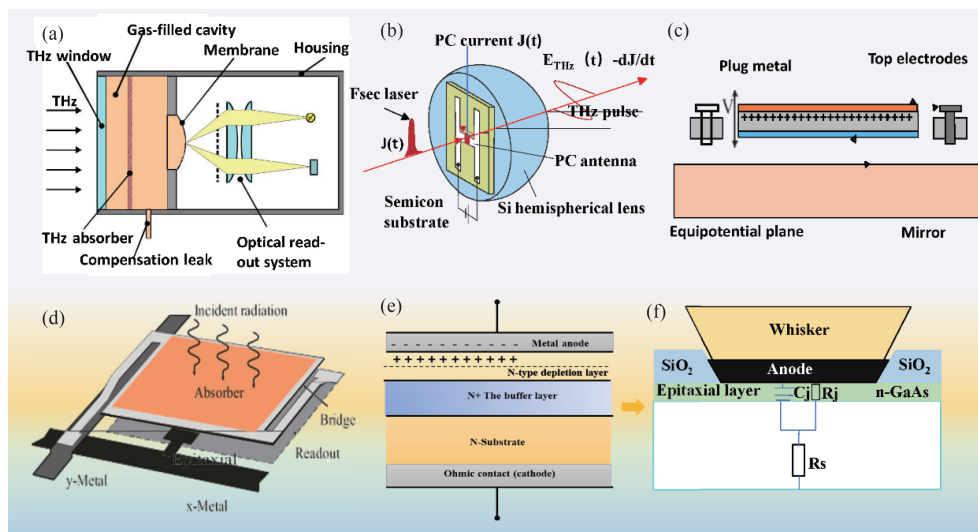


图4 太赫兹探测器示意图 (a) 电光晶体太赫兹探测器^[78], (b) 高莱太赫兹探测器^[83], (c) 热释电太赫兹探测器^[79], (d) 辐射热测量计太赫兹探测器^[54], (e) 肖特基二极管结构图^[89], (f) 肖特基结太赫兹探测器^[79]

Fig. 4 The schematic diagram of typical terahertz detectors (a) electro-optic crystal terahertz detector^[78]; (b) Goly cell terahertz detector^[83], (c) pyroelectric terahertz detector^[79], (d) bolometer terahertz detector^[54], (e) Schottky diode structure diagram^[89], (f) Schottky junction terahertz detector^[79]

好的性能。基于InGaAs的肖特基二极管通常用于零偏压下,主要是因为其在零偏压下其具有大的导通电压,并可以获得出色的噪声系数和更低的功耗。此外,InGaAs肖特基二极管还降低了更高频率下的转换损耗,因为其迁移率较高,所以串联电阻较低。测得InGaAs的肖特基二极管阵列太赫兹探测器的平均响应度为 98.5 V/W ,平均等效噪声功率为 $106.6 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ 。然而在太赫兹探测领域,近几年研究最广泛的器件形式主要是场效应晶体管。

6) 场效应晶体管太赫兹探测器

场效应晶体管有漏极、源极和栅极三个电极,其主要有两种类型,结场效应晶体管和金属-氧化物半导体场效应晶体管。在太赫兹探测领域,场效应晶体管得到了广泛的应用。包括各种材料的场效应晶体管,如石墨烯场效应晶体管太赫兹探测器、Si基的CMOS场效应探测器^[93]、InP高电子迁移率晶体管太赫兹探测器等^[23],除了材料应用广泛外,场效应晶体管太赫兹探测器还利用了等离子体波技术,实现了利用等离子体波和太赫兹辐射信号的共振来探测太赫兹信号的太赫兹探测器^[67]。因此,场效应晶体管形式的器件不仅适合于直接探测器件,也可以用于发展高性能的外差式太赫兹探测器。场效应晶体管太赫兹探测器的等离子体波探测主要包括沟道等离子体探测和表面等离子体探测^[84]。场效应晶体管中的等离子体振荡的谐振

频率会随器件沟道尺寸的减小而增大,当场效应晶体管的栅长在亚微米时,其谐振频率可达太赫兹范围,当迁移率足够高时,太赫兹频段下短沟道场效应晶体管的动力学行为主要表现为等离子体波。此外,当等离子体波振荡超过阻尼,场效应晶体管就能作为一种有效的宽带太赫兹探测器。采用场效应晶体管可以很好地把优异光电性质的材料和先进的技术结合起来,并用于室温太赫兹探测器。图5所示,(a)为基于超导薄膜材料的太赫兹探测器,具有高的灵敏度,但是不适合于室温探测^[7];随着材料技术的发展,基于不同材料的新型场效应晶体也得以发展,图5(b)是基于二维电子气(2DEG)的场效应晶体管^[36],图5(c)是基于碳纳米管的场效应晶体管^[36];图5(d)是基于GaN/AlGaIn的场效应晶体管^[50],图5(e)是基于MoSe₂的场效应晶体管^[34],图5(f)是基于石墨烯和量子点的场效应晶体管^[38],通过量子点来增强石墨烯对太赫兹辐射的吸收;图5(g)是基于黑磷的场效应晶体管^[42];图5(h)是基于拓扑绝缘体的探测器^[94];图5(i)是基于MoS₂的场效应晶体管^[43]。

利用等离子体波进行探测的场效应晶体管太赫兹探测器与肖特基二极管太赫兹探测器相比,具有更高的灵敏度;与热力学探测器相比,有更快的响应速度。主要是因为等离子体波的传播速度比电子的迁移速度快很多,而且很小的电流就能激发

等离子体波^[95]。近几年,把等离子体波应用于谐振和非谐振频宽的太赫兹探测已经取得许多突破性的成果^[96-97]。2013年,Takayuki Watanabe 等人提出了基于 InP/GaAs 的等离子体波高电子迁移率晶体管太赫兹探测器^[23],并指出限制响应率的主要因素是太赫兹辐射和晶体管的低效耦合。为了增强对太赫兹辐射的耦合,设计并优化了太赫兹探测器的天线结构,如通过利用蝶形天线,来增强耦合效率,即可提高太赫兹探测器的响应率。带蝶形天线的太赫兹探测器的响应度达到了 26.1 V/W,等效噪声功率为 15 pW/Hz^{1/2}。2014年,Y. Kurita 等人提出 InP 基非对称双光栅高电子迁移率晶体管等离子体太赫兹探测器^[98],所用的材料为 InAlAs/InGaAs/InP,通过一个非对称双栅结构增强了器件对太赫兹辐射的吸收。室温下,在 200 GHz 和 292 GHz 的辐射下,均测得响应度为 20 kV/W,等效噪声功率小于 1 pW/Hz^{1/2},这个测量值打破了以前所报道的等离子体太赫兹探测器的记录值。研究表明,该等离子体波太赫兹探测器性能如此好的原因主要是因为 InAlAs/InGaAs/InP 材料强的非线性整流效应以及太赫兹辐射源与二维电子气的等离子较强的耦合作用。2015年,由两个欧姆接触的金属光栅制成的 AlGaIn/GaN 等离子体波太赫兹探测器被报道^[50],制造了具有不同光栅图案的探测器,并且在欧姆接触之间的施加电压下,测得其灵敏度在 77 K 下达到 1.9 μ A/W,在 300 K 下达到 0.7 μ A/W,为发展室温工作的太赫兹探测器积累了经验。Dominique Coquillat 等人还研究了衬底的厚度对场效应晶体管响应率的影响,指出选择一个合适的衬底厚度可以提高场效应晶体管太赫兹的性能^[99]。

发展高性能的紧凑型器件是现在探测器的发展趋势,场效应晶体管形式的太赫兹探测器可以很好地与 CMOS 技术兼容,从而极大的降低器件的尺寸。2004年,Knap 等人制造了第一个硅基互补金属氧化物半导体场效应晶体管亚太赫兹、太赫兹探测器^[100]。2006年,Tauk 等人指出,CMOS 场效应太赫兹探测器与当时最好的传统室温太赫兹探测器相比,也是极具竞争力的,因为其噪声等效功率很低。2010年,Pfeiffer 研究组,设计出第一个具有集成天线和放大器的 CMOS THz 探测器的焦平面阵列^[101],并用于约 600 GHz 的多个像素成像,响应度高达 1.1 kV/W,等效噪声功率为 50 pW/Hz^{1/2}。2011年,Franz Schuster 等人^[102],研究了以低成本 130 nm 硅

基 CMOS 技术制造的太赫兹探测器。由 CMOS 场效应晶体管作为整流元件组成的探测器和集成的蝴蝶结耦合天线,在室温 300 GHz 辐射下,实现了高于 5 kV/W 的响应度和低于 10 pW/Hz^{1/2} 的噪声等效功率。这种传统的 Si 基 CMOS 太赫兹探测器大多是通过结的形式来实现的,现在无结形式的太赫兹探测器也已经出现。2015年,J. Marczewski 等人第一次证明无结的场效应晶体管是有效的探测器^[103],这种无结的探测器可以作为双端器件在零栅极偏置模式下工作,从而简化读出电路。并且在传导通道完全打开的范围内,即低电阻状态下,它们的光电响应特性与栅极电压之间的关系也显示出其显著的探测性能,其响应度达到 70 V/W。现阶段,关于 CMOS 太赫兹探测器的研究,主要是通过不断优化栅极管的长度来优化器件的性能,在太赫兹探测器领域 100 nm 下的 CMOS 技术已经可以实现^[85]。

CMOS 技术主要是通过调整了器件的结构来优化器件的性能,此外,通过选择不同维度的材料也是优化太赫兹探测器的性能的重要方向。一维半导体纳米线由于其高的载流子迁移率等性能,在太赫兹探测领域也展现出很大的发展前景。2012年,Miriam S. Vitiello 等人^[70],研制出 InAs 材料的半导体纳米线场效应晶体管探测器,室温 0.3 THz 下测得其响应度大于 1 V/W,噪声等效功率小于 2000 pW/Hz^{1/2}。2015年,Xuechen Chen 等人^[55],研究了 InN 纳米线阵列太赫兹探测器,测得其响应度为 1.1 V/W。研究指出 InN 薄膜和纳米线由于其高饱和载流子迁移速度以及低间隔散射速率而被认为是有效的 THz 发射体候选者。除了这些材料外,InSb 和石墨烯等也被用于纳米线场效应晶体管太赫兹探测器的研究。

7) 其他太赫兹探测器

随着太赫兹探测技术的日益成熟,还有很多其他器件形式的太赫兹探测器被学者们研究,如氩管或辉光放电探测器、隧道结探测器等。氩管或辉光放电探测器可以通过其电流的变化来探测太赫兹辐射^[104],其响应度在 10 ~ 100 V/W。隧道结探测器在 1960s 就被报道了,其既可以用于直接探测也可以用于外差式探测,但由于其非线性的 I - V 特性,隧道结主要被用作外差探测的混频器。这些不同器件形式的太赫兹探测器都有不同的优点,但现在还很难实现,把高响应率、高灵敏度、高探测率和室温工作等集于一个器件上,这也是今后要解决的重要

问题^[105]。

1.4 太赫兹探测器天线

天线是太赫兹探测器的一个重要组成部分,在太赫兹辐射进入探测器的过程中发挥着重要的作用。探测器通过天线来吸收入射的太赫兹辐射,天线可以在馈点处将自由空间传播的太赫兹波转变为射频电流,再通过阻抗变换把这个电流信号传送到探测器上。因此,天线对太赫兹探测器的性能有着至关重要的作用,也是设计太赫兹探测器必须要考虑的因素。天线设计的好坏,直接影响探测器对太赫兹辐射的响应程度^[23]。

天线按照结构原理和工作形式可分为线天线和面天线。常见的线天线通常有偶极子天线、半波长天线和环形天线等;面天线有缝隙天线、反射面天线、喇叭天线、介质天线和透镜天线等^[106]。目前,国内外很多关于太赫兹探测器的研究中,都采用了各种形式的太赫兹天线来增强探测器对太赫兹辐射的响应^[24,107-108]。

太赫兹探测器的天线设计是要考虑很多因素的,针对不同频率的太赫兹辐射需要设计不同的天

线。此外,器件衬底的厚度不同,会对天线具有不同程度的干涉效应,从而影响天线对太赫兹辐射的吸收,进而影响探测器的性能。目前,对太赫兹天线的要求是,太赫兹天线不仅要满足较高的耦合效率,还要尽可能的不影响器件的适用性,例如制作大规模的阵列。如图6所示,近几年常见的太赫兹探测器天线有双极化漏透镜天线^[109]、叉指式天线^[73]、金属级天线^[110]、光电导天线^[111]、对数螺线天线^[112]、对数周期天线^[40]、平面双缝天线^[113]、平面螺旋天线^[114]和蝴蝶型天线^[115],其中漏透镜天线和蝴蝶型天线是近年研究的热点^[71],光电导天线已经实现产品化。为了提高太赫兹探测器的灵敏度,高效率和高性能的天线是具有巨大的前景的。

2 太赫兹探测器特性及应用

太赫兹波处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区,在长波方向属于电子学领域,在短波方向属于光子学领域。正是由于其在电磁波谱中所处的特殊位置,太赫兹波表现出与其他波段不同的特殊光学特性。宇宙中的绝大多数物质都能辐射出

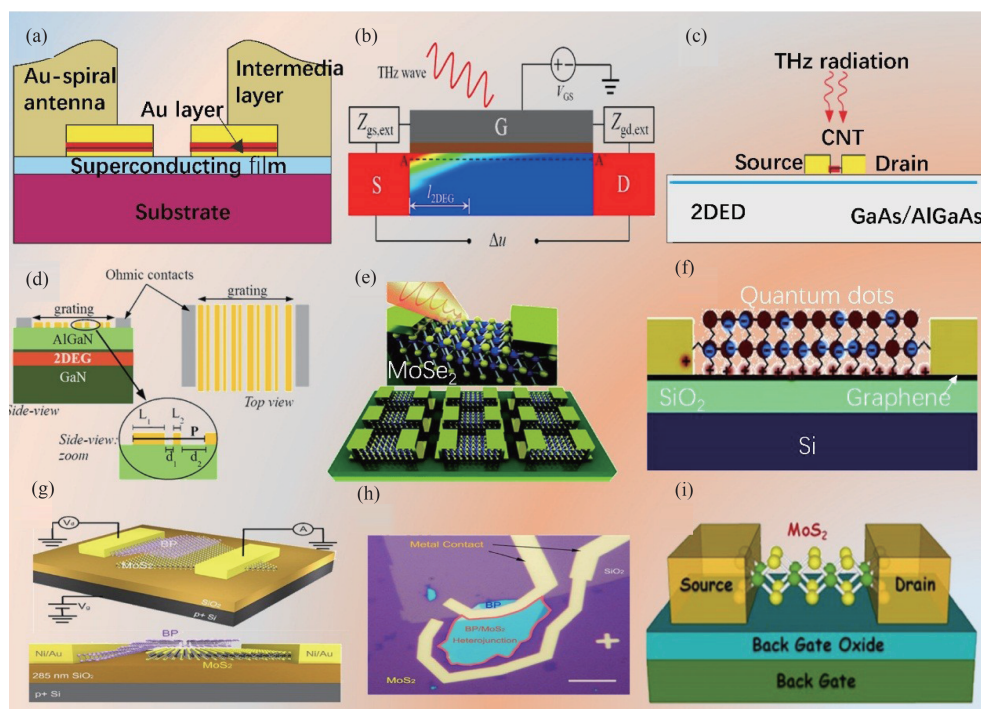


图5 (a) 超导薄膜太赫兹探测器^[7], (b) 二维电子气太赫兹探测器^[36], (c) 碳纳米管太赫兹探测器^[36], (d) GaN/AlGaN 二维电子气太赫兹探测器^[50], (e) MoSe₂太赫兹探测器^[34], (f) 石墨烯太赫兹探测器^[38], (g) 黑磷太赫兹探测器^[42], (h) 拓扑绝缘体太赫兹探测器^[94], (i) MoS₂太赫兹探测器^[43]

Fig. 5 (a) Superconducting film terahertz detector^[7], (b) 2DEG terahertz detector^[36], (c) carbon nanotube terahertz detector^[36], (d) GaN/AlGaN 2DEG terahertz detector^[50], (e) MoSe₂ Terahertz detector^[34], (f) Graphene terahertz detector^[38], (g) BP terahertz detector^[42], (h) Topological insulator terahertz detector^[94], (i) MoS₂ terahertz detector^[43]

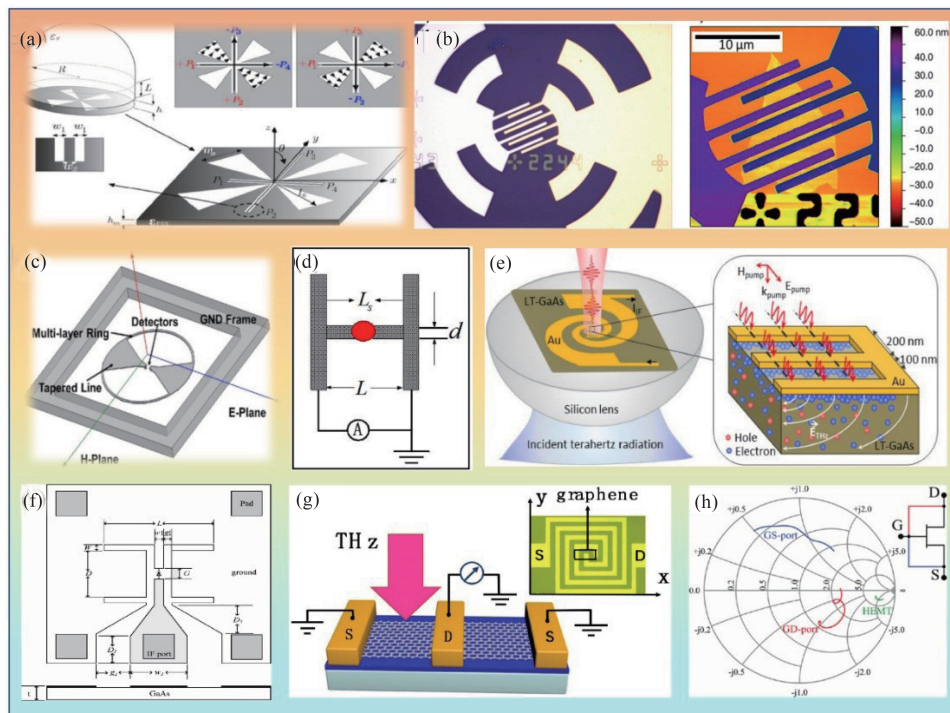


图6 太赫兹天线示意图(a)为双极化漏透镜天线^[112], (b)为指叉式天线及其AFM图^[73], (c)为金属级天线^[107], (d)为光电导天线^[113], (e)为对数螺旋天线^[114], (f)为平面双缝天线^[106], (g)为带平面螺旋天线的太赫兹探测器^[114], (h)为蝴蝶型天线^[115]

Fig. 6 Schematic diagrams of different terahertz antennas, (a) dual polarized leaky lens antenna^[112], (b) logarithmic-periodic antenna^[73], (c) metal-level antenna^[107], (d) photoconductive antenna^[113], (e) logarithmic spiral antenna^[114], (f) planar double slot antenna^[106], (g) the terahertz detector integrated with a square-spiral antenna^[114], (h) bow-tie antennas^[115]

太赫兹波,这些能辐射太赫兹波的物质就是许多天然的太赫兹源,结合太赫兹波的特殊光学性质,利用太赫兹探测器即可获取大量关于这些物质的信息。此外,太赫兹波还有许多特殊的性质,因而无论在军品应用还是民品应用方面均具有极其广阔的应用前景。图7所示,为太赫兹在民用或军事的主要应用示意图。

2.1 太赫兹波的特性

2.1.1 极性分子指纹识别性

自然界中许多极性大分子的振动及转动频率都在太赫兹波段,并且具有很强的吸收和谐振效应。由于不同物质以及不同分子对太赫兹波的吸收和散射是有很区别的,并且这种差异性的吸收和散射是与极性分子一一对应的。这种对应关系就像每个人具有其特殊的指纹,这样对物质的太赫兹光谱进行分析就可以获得丰富的物理和化学信息,从而即可实现对极性分子的有效识别^[116]。

2.1.2 非极性分子透射性

太赫兹波对金属的穿透性和X光类似,穿透性不强。但是,对塑料和陶瓷等非极性材料,太赫兹波具有较强的穿透性。此外,由于太赫兹波段的波

长远大于空气中悬浮的灰尘或烟尘颗粒尺度,太赫兹波可以在浓烟、风沙环境中进行低损耗传输^[117]。

2.1.3 低能量安全性

太赫兹波的光子能量很低,1 THz的太赫兹波

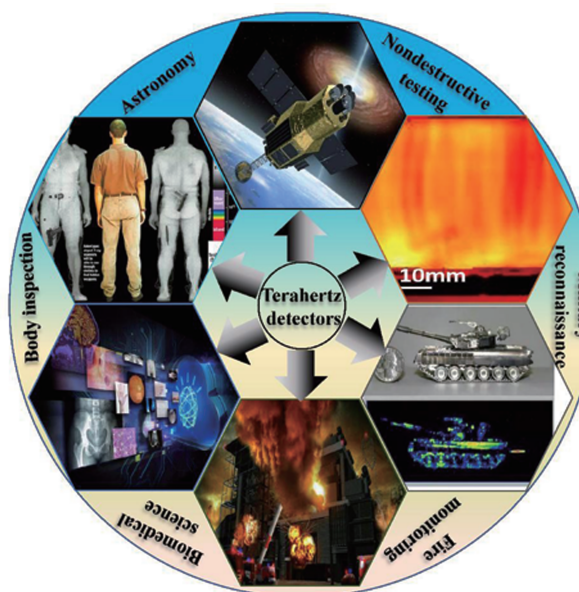


图7 太赫兹探测器应用

Fig. 7 The different applications of terahertz detectors

的能量只有 4.2 meV。与 X 射线相比,它的能量比 X 射线的光子能量低约 7~8 个数量级。因此,不易对人体组织或生物细胞造成不可修复的损伤以及光化电离反应。此外,水对太赫兹波有强烈的吸收,当太赫兹波照射到人体表面时,它只能停留在皮肤表层,不会穿透到人体内部。

2.1.4 空间分辨率高

太赫兹波与微波相比,其具有更高的频率,所以相比于雷达成像,太赫兹具有更高的空间分辨率。

2.1.5 可承载信息量大

与微波通信相比,太赫兹通信具有通信带宽大、方向性好、保密性强和安全性高等优点。

2.2 太赫兹探测器应用领域

由于太赫兹波具有的独特光学特征,使得太赫兹探测器在物理、化学、天文学和生物医学等基础研究领域有着重要的科学研究价值,而且在公共安全检查和国土防御、环境监测、无损检测、卫星通信和雷达武器等领域有着广阔的应用^[118]。其中在医疗诊断、环境监测、无损成像、安全检查和太赫兹雷达方面的应用主要基于太赫兹成像。太赫兹成像主要包括太赫兹实域成像、太赫兹实时成像和太赫兹近场成像。太赫兹探测器是成像系统的核心部分,发挥着重要的作用。通常对频谱分辨率要求较高,且设备使用地点较固定的应用,常使用高灵敏度的外差探测,如医疗诊断。对于直接探测器,其频谱分辨率没有外差探测高,且高性能的室温探测器离商业化还有很大的差距,所以限制了其在各领域的应用^[119]。但在巨大市场应用前景的推动下,高性能太赫兹探测器的发展会越来越成熟。

2.2.1 医疗诊断

太赫兹波对极性分子具有识别性,因而通过太赫兹成像即可识别许多蛋白质等生物大分子。此外,太赫兹波的光子能量较低^[120],且容易被水吸收。用于人体生物成像时,不会损伤人体的内部器官,也不会对生物细胞造成电离损伤。表 3 所示为目前 3 种常见的医疗成像方式。太赫兹医疗成像与它们

相比,具有更高的分辨率,而且具有更好的安全性^[33]。

太赫兹医疗成像诊断不仅是用于民用领域,在战地医疗等军事医疗方面也有很大的市场前景。太赫兹医学成像除了安全性高之外,还有一个优势就是设备的紧凑性。现代发展的太赫兹辐射源和太赫兹探测器都要求具有很高的紧凑性,这样就极大的缩小了医学成像设备的体积,非常有利于野外环境的携带,从而可以很方便的对受伤士兵或生病的士兵进行医疗诊断。

2.2.2 环境监测

利用太赫兹波的高穿透性,可以对环境进行监测。发生火灾时,即使空气中有悬浮的烟尘颗粒,太赫兹波依然能够穿透。通过太赫兹探测器接收到的太赫兹辐射的变化,即可反映出相应的环境信息,从而实现火灾的监测。日本东京理科大学和 NTT 于 2016 年 3 月 17 日宣布,开发出了可在烟雾环境中工作的太赫兹波照明器。已经证实,使用试制的用来验证原理的矩阵型照明器,在肉眼能见度几乎为零的模拟火灾环境中也能获得 1.4 m 远的物体的太赫兹图像。

2.2.3 安全检查及国土防御

太赫兹波的光子能量较低,可用于安检检查。目前,太赫兹人体安检仪已用于一些重大会议和活动的安检。由于太赫兹成像的高响应性,在火车站等人流量较大的地方利用太赫兹安检仪可极大的提高安检的效率。THz 的强透射能力和低辐射能量以及国家在公共安全检测方面的重大需求,比如检测毒品,使得 THz 安全监测有望成为一种新的公共安全监控技术。由于 THz 既可以用于成像,又可以用于波谱分析,且其穿透能力极强,所以可以用其来实现非接触和非破坏性的探测,使其可以很好地应用于国土防御。科学家们曾预测,在不久的将来,THz 成像技术将成为机场、车站及海关等公共场所安全检查的新手段^[121]。据德国弗劳恩霍夫应用技术研究联合会消息,由弗劳恩霍夫物理测试技术研究所(IPM)与 Hübner 公司应用太赫兹成像技术联

表 3 常见的医疗成像

Table 3 Common medical imaging techniques

Name	Detection medium	Characteristics
CT, X-ray examination	X-ray	High spatial resolution, strong ionization damage to cells
B-scan ultrasonography	Ultrasonic	Low cost, low resolution, low signal to noise ratio
MRI	Magnetic field	No ionization damage, safety, complex equipment structure, high cost

合研制的代号为“T-COGNITION”的太赫兹信件安检设备即将投放市场。

2.2.4 无损检测

太赫兹检测与其他无损检测技术相比,在检测非金属材料内部缺陷方面具有独特优势。太赫兹波对非极性材料的高透过性,可以检测到可见光探测不到的内部缺陷。它还可以用于绝热材料,对于这种材料热成像很难正常发挥作用,从而弥补了热成像的不足。和射线相比,其能量很低,能为软材料提供更好的对比度。与超声波相比,它可以不接触物体表面便实现成像,而且在有些材料中声波极度衰减,太赫兹波对于这些材料却非常适用。太赫兹脉冲成像技术还被用于探测航天飞机隔离层泡沫材料中的缺陷^[122]。通过逐点扫描得到各部分的时域波形,然后分析波形的变化来判断缺陷的大小、形状、位置和种类。2003年,美国哥伦比亚号航天飞机失事,主要原因就是因为泡沫材料有大量缺陷,所以太赫兹无损检测具有重要的应用前景。

2.2.5 通信领域

太赫兹波通信比微波通信具有更高的频率带宽,其通讯速度可高达10 GB/s。利用太赫兹通信可以实现大容量、高速度、高保密性和高安全性的无线通信^[123]。但是由于大气中的水对太赫兹波有比较强的吸收作用,从而限制了远距离的太赫兹无线通信的发展。因而太赫兹通信特别适合局域通信,特别是战地通信,它具有高的速度和安全性。研究表明,在太赫兹波谱的低频阶段(0.1~1 THz)存在着几个重要的大气透明窗口,可以利用这些透明窗口实现大容量的近距离太赫兹通信。此外,由于在太空中水汽几乎不存在,所以太赫兹通信可以很好的应用于星际卫星间的通信。

2.2.6 太赫兹雷达

据报道,2016年中国电科顺利完成了全固态太赫兹成像雷达系统样机的研制。这是中国电科首部全固态太赫兹成像雷达系统样机。该太赫兹成像雷达系统由中国电科14所智能感知技术重点实验室研制,它是在中国电科12所、13所、55所,以及电子科技大学的鼎力协助下,经过仅两年多的不懈努力所取得的成果。这一突破性成果完成了太赫兹宽带一维距离像和ISAR成像试验,获得集团首幅ISAR图像,成像分辨率、成像副瓣电平指标均达到预期效果。目前各国取得的成果包括:美国国防高级研究计划局研制出了便携式远距离太赫兹成

像雷达;欧洲已经在2006年成功研制出了通信距离为1.5 km的太赫兹无线通信演示系统;英国的奎奈蒂克公司则已经推出了实用化的太赫兹违禁品探测系统。

太赫兹波在雷达、目标识别、引信及精确制导方面具有潜在的应用前景。利用太赫兹波方向性强、能量集中的特点,可制作高分辨率的战场雷达和低仰角的跟踪雷达。利用太赫兹波穿透物质的成像技术,可以探测隐藏在覆盖物或烟尘中的坦克等军事装备。部队在城市作战以及野外作战时,都可以利用太赫兹雷达来实现敌情侦查,成像效果示意图如图7所示。此外,太赫兹波的频谱宽,可跨越目前隐身技术所能对抗的波段,因此以太赫兹波作为辐射源的超宽带雷达能够获取隐身飞行器的图像,从而在光电对抗领域有着广泛的应用前景。成像识别是太赫兹技术的一个重要应用领域,也是军事上实现目标监视、追踪、识别的重要技术手段。美国早在2009年就已经研制出0.225 THz的机载雷达。我国更应该加快太赫兹雷达的研究进度,使之成为又一项国之利器。此外,在卫星检测和精确制导方面,太赫兹波都具有独特的优势。

2.3 太赫兹探测器应用前景

太赫兹探测器有着巨大的军民两用市场前景,然而现在的太赫兹探测器发展并不能满足现在的市场需求。表4所示为国内的部分太赫兹公司及其产品研发情况。在国内除了北京博睿勤、航天易联、中国电子科技集团第38研究所自主研发了人体太赫兹安检仪,中电14所研制的太赫兹雷达之外,大多数太赫兹公司的产品都是来自国外的品牌,国内的太赫兹器件很少,它们只是代理商。国内的太赫兹市场还有很大的发展空间,虽然近几年太赫兹技术有了很大的发展,但是要形成成熟、稳定的产业规模与国外还存在很大的差距。

3 总结与展望

由于太赫兹波的独特性能,使太赫兹探测器展现出了巨大的市场前景,同时增加了对高性能探测的需求。太赫兹探测器的发展近几年已经取得了重大的突破,但还是不能满足市场需求,高性能的太赫兹探测器离实现商业化还存在很大的距离。现在的太赫兹探测器能探测的频率基本还处于太赫兹波段的低频率,很难实现对高频率的太赫兹波段的探测,实现稳定的可调频率的太赫兹探测器更困难。室温探测器的响应率还有待进一步的提高。

表4 国内太赫兹公司

Table 4 List of domestic company and its terahertz products

Number	Company	Product	Application fields	Remarks
1	Bring Technology Development Co., Ltd.	Cool Guardian terahertz human body security instrument	Safety check of entry and exit of border crossings, government agencies, airports, terminals, stations, large cultural and sports venues, commercial centers and high-risk warehouse security checkpoints	Independent research and development
2	Beijing Aerospace Yi Lian Technology Development Co., Ltd.	Passive terahertz body safety detector	Mobile security checkpoint; personnel security check in different scenarios	Independent research and development
3	Xiao Xiao (Shanghai) Photonics Technology Co., Ltd.	Terahertz system: terahertz power meter, Gallery detector, terahertz photoconductive antenna, real-domain spectral system, terahertz light source, wafer, window, etc	Terahertz system	Agency of European and American
4	Beijing Xun Tianyu Photoelectric Technology Co., Ltd.	Terahertz system and terahertz component	Cultural relics protection, paint testing, industrial process control, nondestructive testing for space shuttles and aircraft, hand-held nondestructive testing systems, lasers	Agency of European and American
5	Anhui Bo micro terahertz Mdt InfoTech Ltd	“TeraSnap” Terahertz body safety detector	Human security checks on various occasions	Independent research and development
6	Huaxun Ark Technology Co., Ltd.	Active cylindrical millimeter wave human body security instrument	Airports, stations, government agencies, prison detention centers, libraries, gymnasiums, etc.	Independent research and development
7	Youshi (Beijing) Technology Co., Ltd.	Terahertz camera (two-dimensional array), terahertz imaging scanner, terahertz source, terahertz optics, terahertz detector	Non-destructive testing for industrial applications(NDT)and quality control(QC)	Acting for TeraSense products from TeraSense, USA
8	Shanghai Love It Photoelectric Technology Co., Ltd.	Terahertz vector network analyzer, terahertz source, terahertz detector, terahertz isolator, terahertz filter, terahertz attenuator, terahertz directional coupler, terahertz antenna, etc.	Terahertz system integrated service	R&D and agency
9	Truth Hz Technology Co., Ltd.	Terahertz source, terahertz sensing device, terahertz system, terahertz function device and accessories	Terahertz device, system	Product agent
10	Meikerui Technology Co., Ltd.	Terahertz material: vanadium dioxide phase change film; terahertz device: zero parametric diode, subharmonic mixer, terahertz antiparallel diode; 110GHz, 140GHz terahertz solid state source	Manufacture of terahertz devices, construction of terahertz systems	Independent research and development

太赫兹探测器的发展,还是朝着更高响应度、更低噪声等效功率、高紧凑性、频率可调型的室温工作探测器发展。制备材料和器件结构是影响器件性能的关键因素,本综述主要从这两个方面简单阐述了太赫兹探测器的发展现状,进而为发展高性能太赫兹探测器提供一个思路。目前,主要可以从以下

几个方面提高探测器的性能:选择室温下具有优异光电性质的新材料,以发展室温太赫兹探测器;把不同维度或不同种类的材料结合起来,使其优势互补;利用天线增强对太赫兹辐射的耦合效率,以增强其响应率;设计新的器件结构,场效应晶体管形式的太赫兹探测器,材料丰富且集成度高,是一种

很有发展前景的器件形式。

References

- [1] Hartmann R R, Kono J, Portnoi M E. Terahertz science and technology of carbon nanomaterials [J]. *Nanotechnology*, 2014, **25**(32):322001.
- [2] ZOU Si. The investigation of Terahertz time-domain spectroscopy systems based on photoconductive antennae [D]. Huazhong University of Science & Technology(邹懿. 光电导天线的太赫兹时域光谱的系统的研究. 华中科技大学), 2013.
- [3] SONG Shu-Fang. Development of the terahertz detection techniques [J]. *Laser & Infrared*(宋淑芳. 太赫兹波探测技术的研究进展. 激光与红外), 2012, **42**(12):1367-71.
- [4] Klapwijk T M, Semenov A V. Engineering Physics of Superconducting Hot-Electron Bolometer Mixers [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2017, PP(99):1-22.
- [5] Liu J, Dai J, Chin S L, et al. Broadband terahertz wave remote sensing using coherent manipulation of fluorescence from asymmetrically ionized gases [C]. *Lasers and Electro-Optics. IEEE*, 2010:1-2.
- [6] Terashima W, Hirayama H. GaN-based terahertz quantum cascade lasers [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2015, 9483.
- [7] Sizov F, Rogalski A. THz detectors [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2010, **34**(5):278-347.
- [8] AN De-Yue. High temperature superconducting terahertz detector [D]. Nanjing University(安德越. 高温超导太赫兹探测器. 南京大学), 2015.
- [9] Müller R, Bohmeyer W, Kehrt M, et al. Novel detectors for traceable THz power measurements [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2014, **35**(8):659-670.
- [10] Mitrofanov O, Luk T S, Brener I. Plasmonic enhancement of sensitivity in terahertz (THz) photo-conductive detectors [C]. *SPIE Optical Engineering & Applications. International Society for Optics and Photonics*, 2015:95850N.
- [11] Créidhe M. O'Sullivan, Murphy J A. *Field guide to terahertz sources, detectors, and optics* [M]. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2012. - 141 p..
- [12] Yang J, Qin H, Zhang K. Emerging terahertz photodetectors based on two-dimensional materials [J]. *Optics Communications*, 2018, **406**:36-43.
- [13] Kawakami A, Shimakage H, Korikawa J, et al. Design and fabrication for the construction of MIR HEB mixers [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, PP(99):1-1.
- [14] Russer J A, Jirauschek C, Szakmany G P, et al. High-speed antenna-coupled terahertz thermocouple detectors and mixers [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2015, **63**(12):4236-4246.
- [15] Hu F, Sun J, Brindley H E, et al. Systems analysis for thermal infrared "THz Torch" applications [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2015, **36**(5):474-495.
- [16] Li W, Liang Z, Wang J, et al. A direct method of thermal time constant measurement for lithium tantalate based terahertz pyroelectric detectors [J]. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 2016, **27**(10):1-7.
- [17] Nguyen T K, Kim W T, Kang B J, et al. Photoconductive dipole antennas for efficient terahertz receiver [J]. *Optics Communications*, 2017, **383**:50-56.
- [18] Peng K, Parkinson P, Boland J L, et al. Broad band phase sensitive single InP nanowire photoconductive terahertz detectors [J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(8):4925-4931.
- [19] Peng K, Parkinson P, Fu L, et al. Single nanowire photoconductive terahertz detectors [C]. *Optoelectronic and Microelectronic Materials & Devices. IEEE*, 2015:206.
- [20] Sun J D. Field-effect self-mixing terahertz detectors [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [21] QIAN Fei, WANG Tian-Meng, ZHANG Yue-Heng, et al. Optimization and performance of p-GaAs homojunction THz detectors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*(钱飞, 王天盟, 张月衢, 等. p-GaAs 同质结太赫兹探测器的优化与性能. 红外与毫米波学报), 2015, **34**(1):29-35.
- [22] SONG Shu-Fang, XING Wei-Rong. Study of design and growth on quantum well structure terahertz material [J]. *Journal of Microwaves*(宋淑芳, 邢伟荣. 量子阱太赫兹探测材料设计与生长的研究. 微波学报), 2015, **31**(6):88-90.
- [23] Watanabe T, Boubanga-Tombet S A, Tanimoto Y, et al. InP-and GaAs-Based plasmonic high-electron-mobility transistors for room-temperature ultrahigh-sensitive terahertz sensing and imaging [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **13**(1):89-99.
- [24] Sun J D, Sun Y F, Wu D M, et al. High-responsivity, low-noise, room-temperature, self-mixing terahertz detector realized using floating antennas on a GaN-based field-effect transistor [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(1):465-9.
- [25] Franke C, Walther M, Helm M, et al. Two-photon quantum well infrared photodetectors below 6 THz [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **70**:30-33.
- [26] Zhang Z Z, Fu Z L, Guo X G, et al. 4.3 THz quantum-well photodetectors with high detection sensitivity [J]. *Chin. Phys. B*, 2018, **27**(3):030701.
- [27] Spirito D, Coquillat D, Bonis S L D, et al. High performance bilayer-graphene terahertz detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(6):97-105.
- [28] LIANG Zhi-Qing, LIU Zi-Ji, JIANG Ya-Dong, et al. High responsivity of terahertz detector based on ultra-thin LiTaO₃ crystal material [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*(梁志清, 刘子骥, 蒋亚东, 等. 基于超薄钽酸锂晶体材料高响应太赫兹探测器 [J]. 红外与毫米波学报), 2016, **35**(5):520-4.
- [29] Müller R, Gutschwager B, Hollandt J, et al. Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2015, **36**(7):654-661.
- [30] Mottamchetty V, Chaudhary A K. Improvised design of THz spectrophotometer using LT-GaAs photoconductive antennas, pyroelectric detector and band-pass filters [J].

- Indian Journal of Physics*, 2016, **90**(1):73–78.
- [31] Eftymiou S, Ozanyan K B. Sensing of pulsed radiation with pyroelectric detectors [C]. *Sensors. IEEE*, 2010: 1372–1376.
- [32] Chen S L, Chang Y C, Zhang C, *et al.* Efficient real-time detection of terahertz pulse radiation based on photoacoustic conversion by carbon nanotube nanocomposite [J]. *Nature Photonics*, 2014, **8**(7):537–542.
- [33] WANG Yue. Research on radiation and scattering of carbon nanotubes at terahertz region [D]. Harbin Institute of Technology (王玥. 碳纳米管太赫兹波辐射与散射研究. 哈尔滨工业大学)2011.
- [34] Liu H, Chen Z, Chen X, *et al.* Terahertz photodetector arrays based on a large scale MoSe₂ monolayer [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, **4**(40):9399–9404.
- [35] Liu Y, Yin J, Wang P, *et al.* High-Performance Ultra-Broadband Ultraviolet to Terahertz Photodetectors Based on Suspended Carbon Nanotube Films [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2018, **10**(42): 36304–11.
- [36] He X, Fujimura N, Lloyd J M, *et al.* Carbon nanotube terahertz detector [J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(7):3953–3958.
- [37] Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, *et al.* Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors [J]. *Nature Materials*, 2012, **11**(10):865–71.
- [38] Qin H, Sun J, He Z, *et al.* Heterodyne detection at 216, 432, and 648 GHz based on bilayer graphene field-effect transistor with quasi-optical coupling [J]. *Carbon*, 2017, **121**:235–241.
- [39] Wanlong G, Lin W, Xiaoshuang C, *et al.* Graphene-based broadband terahertz detector integrated with a square-spiral antenna [J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(8): 1647–50.
- [40] Liu C, Wang L, Chen X, *et al.* Room-temperature photoconduction assisted by hot-carriers in graphene for sub-terahertz detection [J]. *Carbon*, 2018, **130**:233–40.
- [41] Chen M, Wang Y, Wen J, *et al.* Annealing Temperature-Dependent Terahertz Thermal-Electrical Conversion Characteristics of Three-Dimensional Microporous Graphene [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, **11**(6): 6411–20.
- [42] Viti L, Hu J, Coquillat D, *et al.* Black Phosphorus Terahertz Photodetectors [J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(37):5567–72.
- [43] Deng X Y, Deng X H, Su F H, *et al.* Broadband ultrahigh transmission of terahertz radiation through monolayer MoS₂ [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **118**(22): 224304.
- [44] Vitl L, Politano A, Zhang K, *et al.* Thermoelectric terahertz photodetectors based on selenium-doped black phosphorus flakes [J]. *Nanoscale*, 2019, **11**(4): 1995–2002.
- [45] Vitl L, Hu J, Coquillat D, *et al.* Heterostructured hBN-BP-hBN Nanodetectors at Terahertz Frequencies [J]. *Adv Mater*, 2016, **28**(34): 7390–6.
- [46] Tang W, Politano A, Guo C, *et al.* Ultrasensitive Room-Temperature Terahertz Direct Detection Based on a Bismuth Selenide Topological Insulator [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(31): 1801786.
- [47] Brems M R, Paaske J, Lunde A M, *et al.* Strain-enhanced optical absorbance of topological insulator films [J]. *Physical Review B*, 2018, **97**(8):081402.
- [48] Lawal A, Shaari A, Ahmed R, *et al.* First-principles investigations of electron-hole inclusion effects on optoelectronic properties of Bi₂Te₃, a topological insulator for broadband photodetector [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2017; **520**(69–75).
- [49] Yang J, Yu W, Pan Z, *et al.* Ultra-Broadband Flexible Photodetector Based on Topological Crystalline Insulator SnTe with High Responsivity [J]. *Small*, 2018, **14**(37): 1802598.
- [50] Hu W D, Wang L, Chen X S, *et al.* Room-temperature plasmonic resonant absorption for grating-gate GaN HEMTs in far infrared terahertz domain [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2013, **45**(7):713–720.
- [51] Spisser H, Grimault-Jacquelin A S, Zerounian N, *et al.* Room-temperature AlGaN/GaN terahertz plasmonic detectors with a zero-bias grating [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2015, **43**(3):1–15.
- [52] TU Xue-Cou. Terahertz detectors based on Nb₅N₆ thin film microbolometer [D]. Nanjing University (涂学凑. Nb₅N₆ microbolometer 太赫兹探测器. 南京大学), 2014.
- [53] Jiang Y, Jin B B, Xu W W, *et al.* Terahertz detectors based on superconducting hot electron bolometers [J]. *Science China (Information Sciences)*, 2012, **55**(1):64–71.
- [54] Seliverstov S, Maslennikov S, Ryabchun S, *et al.* Fast and sensitive terahertz direct detector based on superconducting antenna-coupled hot electron bolometer [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2015, **25**(3):1–4.
- [55] Chen X, Liu H, Li Q, *et al.* Terahertz detectors arrays based on orderly aligned InN nanowires [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**:13199.
- [56] Saito K, Tanabe T, Oyama Y. Terahertz-wave detection in a GaP-based hybrid waveguide using a nonlinear optical parametric process [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, **32**(4):708–713.
- [57] Min W R, Lee J S, Kim K S, *et al.* High-performance plasmonic THz detector based on asymmetric FET with vertically integrated antenna in CMOS technology [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, **63**(4): 1742–1748.
- [58] Domingues S, Perenzoni D, Perenzoni M, *et al.* CMOS integrated lock-in readout circuit for FET terahertz detectors [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2017, **38**: 679–688.
- [59] Alves F, Grbovic D, Kearney B, *et al.* Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(11):13256–71.
- [60] GOU Jun. Research on room temperature terahertz detector based on VOx microbolometer [D]. University of Electronic Science and Technology of China (苟君. 基于氧化钒辐射热计的室温太赫兹探测器研究. 电子科技大学)2014.
- [61] LUO Zhen-Fei, ZHOU Xun, LI Ze-Yu. Terahertz detectors based on the thermal sensing characteristics of vanadium oxides [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* (罗振飞, 周逊, 李贻宇. 基于氧化钒热敏特性的太赫兹探测器. 太赫兹科学与电子信息学报), 2013, **3**:328–31.

- [62] WEI Xiao-Ying. Optical and electric characteristic of semiconductor functional films of vanadium oxide and its application[D]. Tianjin University (韦晓莹. 氧化钒半导体功能薄膜的光电特性及其应用基础研究. 天津大学), 2014.
- [63] LIU Hui-Qiang. Synthesis of ZnO and InN nanomaterials and study on the terahertz detector based on single ZnO nanowire [D]. Southwest University of Science and Technology (刘辉强. ZnO、InN 纳米材料的制备及单根 ZnO 纳米线太赫兹探测器的研究. 西南科技大学), 2015.
- [64] LIN Zuo-Ye, LIANG Jiong-Qiang, LIU Han, *et al.* High mobility ZnO nanowires for terahertz detection applications [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* (林左叶, 梁炯强, 刘韩, 等. 高迁移率 ZnO 纳米线的太赫兹探测器应用. 太赫兹科学与电子信息学报), 2014, **12**(5):647-52.
- [65] Peralta X G, Allen S J, Wanke M C, *et al.* Terahertz photoconductivity and plasmon modes in double-quantum-well field-effect transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(9):1627-1629.
- [66] Wang H X, Fu Z L, Shao D X, *et al.* Broadband bias-tunable terahertz photodetector using asymmetric GaAs/Al-GaAs step multi-quantum well [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, **113**(17):171107.
- [67] Klimentenko O A, Knap W, Iniguez B, *et al.* Temperature enhancement of terahertz responsivity of plasma field effect transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(1):2465-87.
- [68] 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):25874-82.
- [69] Vitiello M S, Viti L, Romeo L, *et al.* Semiconductor nanowires for highly sensitive, room-temperature detection of terahertz quantum cascade laser emission [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(24):97.
- [70] Vitiello M S, Coquillat D, Viti L, *et al.* Room-temperature terahertz detectors based on semiconductor nanowire field-effect transistors [J]. *International Journal of High Speed Electronics & Systems*, 2012, **12**:96-101.
- [71] Zak A, Andersson M A, Bauer M, *et al.* Antenna-integrated 0.6 THz FET direct detectors based on CVD graphene [J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(10):5834.
- [72] Cai X, Sushkov A B, Suess R J, *et al.* Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, **9**(10):814-9.
- [73] Mittendorf M, Winnerl S, Kamann J, *et al.* Ultrafast graphene-based broadband THz detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(2):666.
- [74] Sizov F F, Reva V P, Golenkov A G, *et al.* Uncooled detectors challenges for THz/sub-THz arrays imaging [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2011, **32**(10):1192-1206.
- [75] HU Xiao-Yan. Research progress and trends of terahertz technology from the view of photonics[J]. *Laser & Infrared* (胡小燕. 从光子学角度看太赫兹技术的现状和发展趋势. 激光与红外), 2015, **7**:740-8.
- [76] Shurakov A, Lobanov Y, Goltsman G. Superconducting hot-electron bolometer: from the discovery of hot-electron phenomena to practical, applications [J]. *Superconductor Science & Technology*, 2016, **29**(2):023001.
- [77] Giovine E, Casini R, Dominijanni D, *et al.* Fabrication of Schottky diodes for terahertz imaging [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, **88**(8):2544-2546.
- [78] Darmo J, Dietze D, Martl M, *et al.* Nonorthodox heterodyne electro-optic detection for terahertz optical systems [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98**(16):161112.
- [79] Rogalski A, Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays [J]. *Opto-Electronics Review*, 2011, **19**(3):346-404.
- [80] Xu G D, Tsai C S. Novel integrated acousto-optic and electro-optic heterodyning device in a LiNbO₃ waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **58**(1):28.
- [81] Qiu F, Xu H, Cao Y, *et al.* Nonlinear optical materials: Synthesis, characterizations, thermal stability and electro-optical properties [J]. *Materials Characterization*, 2007, **58**(3):275-283.
- [82] WU G, TANG L B, Hao Q, *et al.* Research Progress in the Uncooled Terahertz Imaging Detection Technology [J]. *Infrared Technology* (吴刚, 唐利斌, 郝群等. 非制冷太赫兹成像探测技术研究进展. 红外技术), 2018, **40**(6):5-9.
- [83] Klocke D, Schmitz A, Soltner H, *et al.* Infrared receptors in pyrophilous ("fire loving") insects as model for new un-cooled infrared sensors [J]. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2011, **2**(1):186-197.
- [84] R A Lewis. A review of terahertz detectors [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2019, **52**(43):433001.
- [85] Zhao X G, Wang Y, Schalch J, *et al.* Optically modulated ultra-broadband all-silicon metamaterial terahertz absorbers [J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(4):830-837.
- [86] Wu C Y, Zhou W, Yao N J, *et al.* Silicon-based high sensitivity of room-temperature microwave and sub-terahertz detector [J]. *Applied Physics Express*, 2019, **12**(5):052018.
- [87] Timofeev A, Luomahaara J, Grönberg L, *et al.* Optical and electrical characterization of a large kinetic inductance bolometer focal plane array [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2017, PP(99):1-7.
- [88] LIU Hai-Rui. Research on quasi-optical detector based on planar schottky diode [D]. Beijing University of Posts and Telecommunications (刘海瑞. 基于平面肖特基二极管的准光检波器研究. 北京邮电大学), 2013.
- [89] Maas S A. Nonlinear microwave and RF circuits [M]. Artech House, 2003, 497-535.
- [90] Sakhno M, Golenkov A, Sizov F. Uncooled detector challenges: Millimeter-wave and terahertz long channel field effect transistor and Schottky barrier diode detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**(16):1-4.
- [91] Preu S, Mittendorf M, Winnerl S, *et al.* THz Autocorrelators for ps pulse characterization based on Schottky Diodes and rectifying field-effect transistors [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, 2015, **5**(6):922-929.
- [92] 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):25874-82.
- [93] Sakhno M, Sizov F, Golenkov A. Uncooled THz/sub-THz

- rectifying detectors: FET vs. SBD [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2013, **34**(12):798–814.
- [94] Viti L, Coquillat D, Politano A, *et al.* Plasma-wave terahertz detection mediated by topological insulators surface states [J]. *Nano Letters*, 2015, **16**(1):80–87.
- [95] Kushwaha M. Resonant response of a field-effect transistor to an ac signal [C]. 2005 APS March Meeting. American Physical Society, 2005.
- [96] Knap W, Valušis G, Łusakowski J, *et al.* Field effect transistors for terahertz imaging [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2009, **30**(12):1319–1337.
- [97] Dyakonov M I. Generation and detection of terahertz radiation by field effect transistors [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2012, **11**(7):413–420.
- [98] Kurita Y, Ducournau G, Coquillat D, *et al.* Ultrahigh sensitive sub-terahertz detection by InP-based asymmetric dual-grating-gate high-electron-mobility transistors and their broadband characteristics [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(25):380.
- [99] Coquillat D, Marczewski J, Kopyt P, *et al.* Improvement of terahertz field effect transistor detectors by substrate thinning and radiation losses reduction [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(1):272–81.
- [100] Shalaby M, Vicario C, Hauri C P. Anomalous visualization of sub-2 THz photons on standard silicon CCD and COMS sensors [J]. *Physics*, 2015.
- [101] Cui X, Yang C, Tearney G J. Quantitative differential interference contrast (DIC) microscopy and photography based on wavefront sensors: US, US 8039776 B2 [P]. 2011.
- [102] Schuster F, Coquillat D, Videliere H, *et al.* Broadband terahertz imaging with highly sensitive silicon CMOS detectors [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(8):7827–32.
- [103] Marczewski J, Knap W, Tomaszewski D, *et al.* Silicon junctionless field effect transistors as room temperature terahertz detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **118**(104502).
- [104] Slocombe L. L., Lewis R. A. Electrical versus optical: comparing methods for detecting terahertz radiation using neon lamps [J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2018, **39**(8): 701.
- [105] Ezawa J, Matsuo H, Ukibe M, *et al.* Studies on terahertz photon counting detectors with low-leakage SIS junctions [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2019, **194**(5):426–432.
- [106] XU Qin-Yin. Nb-based superconducting tunnel junction terahertz direct detector [D]. Nanjing University (许钦印. 铌基超导隧道结太赫兹直接检测器. 南京大学), 2013.
- [107] Dyer G C, Preu S, Aizin G R, *et al.* Enhanced performance of resonant sub-terahertz detection in a plasmonic cavity [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(8):405.
- [108] Jha K R, Singh G. Terahertz planar antennas for future wireless communication: A technical review [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **60**(5):71–80.
- [109] Yurduseven O, Llombart N, Neto A, *et al.* A dual polarized antenna for THz space applications: Antenna design and lens optimization [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE*, 2014:191–192.
- [110] Yurduseven O, Llombart N, Neto A, *et al.* A dual polarized antenna for THz space applications: Antenna design and lens optimization [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE*, 2014:191–192.
- [111] Grzyb J, Al Hadi R, Pfeiffer U R. Lens-integrated on-chip antennas for THz direct detectors in SiGe HBT technology [C]. *Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE*, 2013:2265–2266.
- [112] Liu J, Zou S, Yang Z, *et al.* Wave shape recovery for terahertz pulse field detection via photoconductive antenna [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(13):2268.
- [113] Wang N, Jarrahi M. Broadband heterodyne terahertz detector based on plasmonic photomixing [C]. *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE*, 2016:1–2.
- [114] Guo D L, Mou J C, Zhao-Hui M A, *et al.* A broadband terahertz quasi-optical detector utilizing lens-based antenna [J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2016, **4**:389–393.
- [115] Guo W, Wang L, Chen X, *et al.* Graphene-based broadband terahertz detector integrated with a square-spiral antenna [J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(8):1647–1650.
- [116] Bauer M, Rämmer A, Boppel S, *et al.* High-sensitivity wideband THz detectors based on GaN HEMTs with integrated bow-tie antennas [C]. *Microwave Integrated Circuits Conference. IEEE*, 2015.
- [117] ZHU Ying-Jie. Study on optimization design of CMOS terahertz detector [D]. Nanjing University (朱颖杰. CMOS太赫兹探测器的优化设计研究. 南京大学), 2016.
- [118] JIANG Cheng-Yue. Generation and detection of terahertz wave using a parametric process in lithium niobate [D]. Huazhong University of Science & Technology (蒋呈阅. 基于铌酸锂晶体参量过程产生与探测太赫兹波. 华中科技大学), 2013.
- [119] Liu Z, Liu L, Zhang Z, *et al.* Terahertz detector for imaging in 180 nm standard CMOS process [J]. *Science China (Information Sciences)*, 2017, **60**(8):082401.
- [120] Wang C, Qin J Y, Xu W D, *et al.* Terahertz Imaging Applications in Agriculture and Food Engineering: A Review [J]. *Transactions of the ASABE*, 2018, **61**(2): 411–24.
- [121] Guillet J P, Recur B, Balacey H, *et al.* Low-frequency noise effect on terahertz tomography using thermal detectors [J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(22):6758–62.
- [122] YANG Guang-Kun, YUAN Bin, XIE Dong-Yan. Analysis on the use of THz technology in the military application [J]. *Laser & Infrared* (杨光鲲, 袁斌, 谢东彦. 太赫兹技术在军事领域的应用. 激光与红外), 2011, **41**(4):376–80.
- [123] MIN Bi-Bo, ZENG Chang-E, YIN Xin, *et al.* Application of terahertz techniques in military and space [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* (闵碧波, 曾嫦娥, 印欣, 等. 太赫兹技术在军事和航天领域的应用. 太赫兹科学与电子信息学报), 2014, **12**(3):351–4.
- [124] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz communications research [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2011, **32**(2):143–171.