

高速太赫兹探测器

张真真 黎华 曹俊诚

Ultrafast terahertz detectors

Zhang Zhen-Zhen Li Hua Cao Jun-Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 090702 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180226

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180226>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[低温冷冻靶温度动态特性的数值模拟研究](#)

Numerical simulation of dynamic thermal characteristics of cryogenic target  
物理学报.2017, 66(19): 190702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.190702>

[室温磁制冷技术的研究进展](#)

Progress of room temperature magnetic refrigeration technology  
物理学报.2017, 66(11): 110701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.110701>

[双量子点结构中 Majorana 费米子的噪声特性](#)

Shot noise characteristics of Majorana fermions in transport through double quantum dots  
物理学报.2015, 64(16): 167302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167302>

[分子激发中的表面等离激元增强效应](#)

Surface plasmon enhancement effect in molecular excitation  
物理学报.2014, 63(9): 097301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.097301>

[应用于弱光探测的热敏超导谐振器](#)

Thermal-sensitive superconducting coplanar waveguide resonator used for weak light detection  
物理学报.2014, 63(7): 070701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.070701>

## 综述

## 高速太赫兹探测器\*

张真真<sup>1)2)</sup> 黎华<sup>1)†</sup> 曹俊诚<sup>1)‡</sup>

1)(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2018年1月30日收到; 2018年3月7日收到修改稿)

太赫兹 (terahertz, THz) 技术在高速空间通信、外差探测、生物医学、无损检测和国家安全等领域具有广阔的应用前景. 能响应 1 GHz 调制速率以上 THz 光的高速 THz 探测器是快速成像、THz 高速空间通信、超快光谱学应用技术和 THz 外差探测等领域的核心器件. 传统的 THz 热探测器难以实现高速工作, 而基于半导体的 THz 探测器在理论上可实现高速工作. 光导天线具有超快的响应速度, 可实现常温和宽谱探测; 肖特基势垒二极管混频器、超导-绝缘体-超导混频器和超导热电子混频器具有转换效率高、噪声低等优点, 可用于高速 THz 空间外差和直接探测; 基于高迁移率二维电子气的天线耦合场效应晶体管灵敏度高、阻抗低, 可实现常温高速 THz 探测; THz 量子阱探测器是一种基于子带间跃迁原理的单极器件, 非常适合高频和高速探测应用, 亚波长金属微腔耦合机理可显著提高器件的工作温度及光子吸收效率. 本文对上述几种高速 THz 探测器进行了综述并分析了各种探测器的优缺点.

关键词: 太赫兹, 高速探测, 混频器, 量子阱探测器

PACS: 07.20.Mc, 73.21.-b, 85.60.Gz

DOI: 10.7498/aps.67.20180226

## 1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波通常是指频率为 100 GHz—10 THz, 相应波长在 3 mm—30  $\mu\text{m}$  内, 介于毫米波与红外光之间的电磁波<sup>[1]</sup>. THz 波在电磁波谱中占有特殊的位置, 处于电子学向光子学的过渡区域, 其长波端与亚毫米波相重合, 而短波端与远红外波段相重合<sup>[2]</sup>. THz 波与其他频段的电磁波相比, 具有许多独特的优点: THz 波可以穿透塑料、衣物、纸张等材料, 但对生物体没有伤害, 可以用于无损生物探测成像; THz 波对于许多毒品和爆炸物的粉末都具有独特的特征谱, 可以用于毒品爆炸物的安全检测等<sup>[3,4]</sup>. 此外, THz 技术在信息通信技术领域、生物医学、太空探测以及全球性

环境检测领域都具有非常广泛的应用潜力. 特别是近年来超材料的发展, 为人们填补这一“THz 空隙”提供了有力的技术支持, 从而可以对 THz 应用进行更积极深入的探索<sup>[5-7]</sup>. 基于各种几何结构的微型谐振腔阵列, 可以把自由空间传播的电磁波限制在亚波长尺寸甚至纳米尺寸的体积内. 这个特性被用于高效表面检测, 超低暗电流量子阱探测器、调制器, 以及超强光与物质相互作用的研究<sup>[8]</sup>.

高速 THz 探测器是快速成像、高速空间通信、超快光谱学应用技术以及外差探测的核心部件. 传统的 THz 探测器大多数基于热效应, 所以很难实现探测器高速工作. 而基于半导体的 THz 探测器由于载流子弛豫过程快, 在理论上被认为是可以实现高速工作的. 但是在实际器件结构中, 受限于载流子渡越时间、载流子本征弛豫时间以及器件

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2014CB339803)、国家重点研发计划 (2017YFF0106302)、国家自然科学基金 (批准号: 61575214, 61405233, 61404150) 和中国科学院“百人计划”资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hua.li@mail.sim.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

电阻-电容(RC)电路,很难实现1 GHz以上调制的THz光探测. THz光导天线是一种具有超快响应速度的常温宽带探测器,在时域光谱系统中,常用来做快速成像和成谱的探测;用于航空航天和大气物理探测的超导热电子测辐射热仪(superconductive hot electron bolometer, SHEB)混频器,即基于热电子效应的平面超导薄膜混频器,其频率已经由毫米波扩展到几太赫兹<sup>[9]</sup>;基于GaN/AlGaN异质结等准二维电子气和石墨烯二维电子(空穴)气的天线耦合场效应晶体管(field effect transistors, FET)探测器,具有低阻抗和高灵敏度的优点,非常适合THz波段的室温高速高灵敏度探测及大面积快速焦平面阵列成像<sup>[10-12]</sup>.

THz量子阱探测器(quantum well photodetector, QWP)已被证明是一种超快和高灵敏度的光电探测器<sup>[13-15]</sup>.这种器件是红外量子阱探测器(quantum well infrared photodetector, QWIP)在THz波段的自然扩展,其利用半导体量子阱超晶格(一般是n型掺杂的GaAs/AlGaAs)中的子带间跃迁吸收来产生光电流.光耦合方式是影响红外QWIP和THz QWP性能的一个关键因素<sup>[16,17]</sup>.好的耦合方式可以抑制器件的暗电流,优化器件的响应率、极化灵敏度以及BLIP(background-noise-limited performance,背景辐射电流为主导的工

作模式)工作性能<sup>[18,19]</sup>.将双面金属微腔结构与THz QWP相结合,不仅可以满足子带间跃迁选择定则<sup>[20]</sup>,实现光的正入射耦合,还可以提高器件的响应率和工作温度.本文综述了THz宽带光导天线、肖特基势垒二极管(Schottky barrier diode, SBD)混频器、超导-绝缘体-超导(superconductor-insulator-superconductor, SIS)混频器、SHEB混频器、基于天线耦合的FET和THz QWP的原理及最新进展,分析了以上THz探测器在高速应用中的优势及不足.

## 2 THz光导天线

光导天线是目前THz波段最重要的常温探测器之一.第一个飞秒激光抽运的皮秒级超短脉冲激光器的研制<sup>[21]</sup>,使得用光电导方法<sup>[22]</sup>和电光方法<sup>[23]</sup>产生和探测THz波得到了很好的发展<sup>[24-26]</sup>.典型光导开关的结构如图1(a)<sup>[27]</sup>所示,在半导体衬底上,制作间隙为几微米两个平行金属线,称为Grischkowsky天线<sup>[28]</sup>.当飞秒激光脉冲聚焦到天线阳极附近时,在半导体衬底内部就会有光生载流子产生,这些载流子在电极之间的强电场作用下加速,向外辐射THz电磁波.衬底背面的高阻硅透镜起到光斑汇聚的作用.

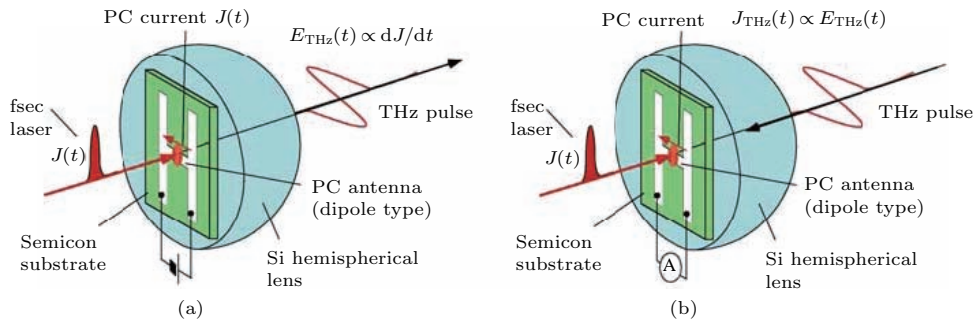


图1 (a)光导天线辐射源和(b)光导天线探测器示意图<sup>[27]</sup>

Fig. 1. Schematic diagrams of (a) photoconductive emitter antenna and (b) photoconductive detector<sup>[27]</sup>.

THz光导天线探测器(图1(b))的结构和原理均与辐射源类似:飞秒激光触发天线内部产生光生载流子,入射THz辐射在天线两电极之间引入一个瞬态电场,当激光脉冲在空间和时间上与入射THz波的电场一致时,就会产生与入射电场成正比的光电流.通过对激光脉冲进行延迟,就可以实时探测光导天线内部光电流的变化.

THz成像<sup>[29]</sup>及光谱<sup>[30]</sup>技术中,时域光谱系统

是最常用的探测系统<sup>[31,32]</sup>.在该系统中,光导天线既可以作为THz源,也可以作为探测器.其原理如图2所示,由飞秒激光器发出的光被分为两束,一束打到光导天线上发出THz辐射,经两个离轴抛物面镜反射及准直后,与另一束延迟了相位的激光一同入射到接收器上实现实时的成像及光谱探测.图2中可以用光导天线代替QWP,作为THz探测器.

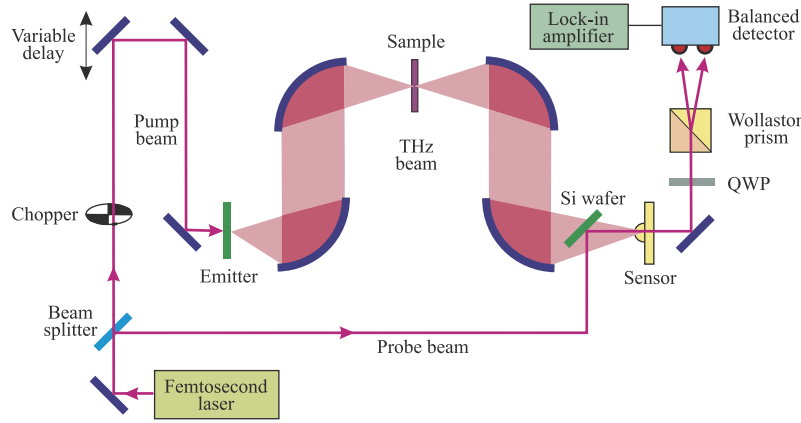


图2 THz时域光谱系统示意图 [33,34]

Fig. 2. Schematic diagram of THz-time domain system [33,34].

光导天线的高频性能受到低温生长的GaAs (LT-GaAs) 材料载流子寿命以及天线RC电路产生的寄生电容及辐射电阻的限制 [35]. Peytavit 等 [36] 在不降低光电导体量子效率的情况下, 减小了低温GaAs层的厚度, 利用双面金属结构制作了一个法布里-珀罗谐振腔(F-P腔), 得到了带宽为1 THz的光导天线混频器. 图3左侧所示为圆形微腔的光导天线结构示意图, 上下金属板与中间厚度为0.28  $\mu\text{m}$ 的LT-GaAs材料组成了一个双面金属介质微腔, 腔的上表面通过空气桥与薄膜微带线喇叭天线或贴片天线相连 [37]. 对不同厚度介质微腔的光导天线(图3右侧)进行响应率计算和实验测试, 结果如图4所示. 在微腔介质层厚度小于0.5  $\mu\text{m}$ 时, 混频器的直流响应率大于0.1 A/W. 由于THz波与介质腔中的等离子体波发生共振增强, 使腔内电流密度可高达50  $\text{kA}/\text{cm}^2$  [36]. 这种金属-介质-金属微腔结构的THz光导天线混频器, 突破了RC电路寄生电容和寄生电阻对器件高频应用的限制, 改善了经典平面结构光导天线在高频应用中的性能.

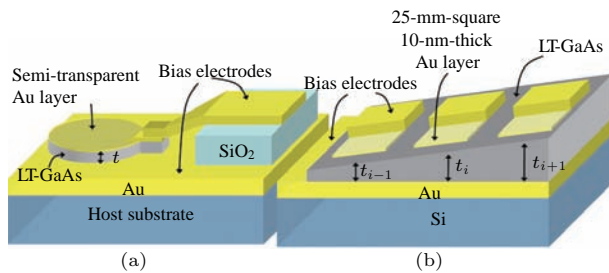


图3 F-P 谐振腔光导天线示意图 [36]

Fig. 3. Schematic diagram of the F-P cavity photoconductor antennas [36].

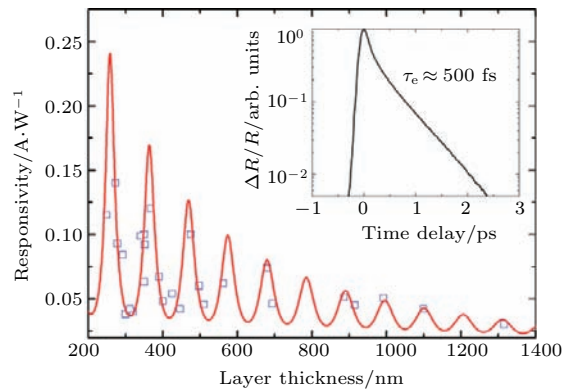


图4 不同厚度LT-GaAs介质微腔光导天线的响应率理论计算及实验结果图(其中红色连续曲线为理论计算结果, 紫色方框为实验数据; 内插图为电子的弛豫时间) [36]

Fig. 4. Theoretical (solid line) and experimental (in squares) reponsivities as a function of LT-GaAs layer thickness [36].

### 3 THz波混频器

THz波的外差探测在地球大气研究领域具有非常重要的应用 [38,39]. THz混频器可以用于行星和彗星的大气层 [40] 以及生物医学成像等领域的研究 [41]. 外差探测的原理是: 当两个频率相近的电流在同一个非线性电路中拍频后, 会产生一个新的和频、差频或倍频的输出信号. 对外差探测器进行优化可以在不同频率进行探测, 典型的THz外差探测器的拍频信号在几千兆赫兹. 文献 [33] 详细介绍了外差探测系统的原理. 外差探测技术在远红外及毫米波段相对成熟, 近几十年来逐渐向THz波段扩展. 这是由于THz信号可以向低频方向下转换, 即使缺乏有效的高频放大器, 依然可以实现外差探测. 然而, 在THz波段, 只有少数几种探测器

具有较高的转换效率和较低的噪声<sup>[34]</sup>, 这些探测器包括SBD混频器<sup>[42]</sup>、SIS混频器<sup>[43]</sup>和SHEB混频器等。

SBD混频器是THz外差混频技术的一种基本元器件<sup>[44]</sup>。当金属和半导体紧密接触时, 在半导体表面就会形成肖特基势垒。当THz电场在肖特基势垒中产生的电压足够大时, 半导体中的电子就会穿过势垒到达金属, 从而产生响应电流, 这就是SBD工作的基本原理。电子的渡越时间是影响SBD混频器超快特性的主要因素, 因为电子必须有足够的时间(THz电场的半个周期内)穿过耗尽区才能越过势垒。此外, 趋肤效应、载流子惯性和等离子体共振等也会对工作在THz频段的SBD混频器产生较大影响。SBD的截止频率定义为串联电阻与零偏压下结电容相等时的频率<sup>[45]</sup>, 与其他二极管不同的是, 即使在截止频率以上, SBD也可以用来做混频<sup>[46]</sup>。THz波段SBD最典型的芯片结构是如图5<sup>[47]</sup>所示“蜂巢”(“Honeycomb”)结构<sup>[48]</sup>。这种结构将几千个二极管集成在单个芯片上, 可以使串联电阻和并联电容之类的寄生损耗最小化。目前, 基于二维超材料结构的SBD<sup>[49]</sup>, 已经可以实时控制和调控THz辐射, 其结构如图6所示<sup>[8]</sup>。随着先进半导体工艺的不断发展, SBD可以与许多无源电路元器件(例如滤波器和波导等)集成在同一块电路板上(如图7所示<sup>[34]</sup>), 使SBD的高频应用更加方便。

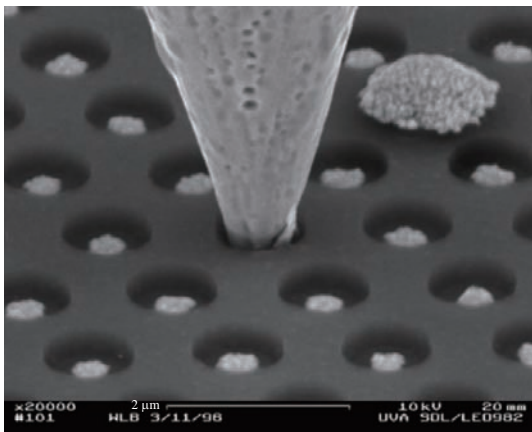


图5 “蜂巢”结构SBD的扫描电子显微镜照片<sup>[47]</sup>  
Fig. 5. Scanning electron microscopy image of GaAs Schottky barrier whisker contacted diode with honeycomb structure<sup>[47]</sup>.

SIS混频器的结构如图8所示, 两个超导电极中间有一层厚度约20 Å的绝缘层势垒组成一个三明治结构, 超导电极中的准粒子吸收光子后, 穿过

绝缘层势垒发生隧穿效应<sup>[50]</sup>。THz波段的SIS混频器通常选用Nb或NbTiN材料来制作超导电极(两种材料的禁带宽度分别为0.7 THz和1.2 THz左右<sup>[51,52]</sup>), 结区的面积约为1 μm<sup>2</sup>, 在结的两侧制作SiO<sub>2</sub>绝缘层可以在结顶部连接射频调制电路时充当介质层。目前, SIS混频器主要用在1.3 THz以下THz波的空间外差探测<sup>[43]</sup>。混频器信号的带宽通常会受到器件电阻和电容的限制, 随势垒区厚度的增加而减小, 与结面积无关。例如, Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb结的SIS混频器带宽约为100 GHz<sup>[53]</sup>, 把AlO<sub>x</sub>材料替换为AlN, 可以降低势垒的高度, 使带宽提高到约300 GHz<sup>[54]</sup>。

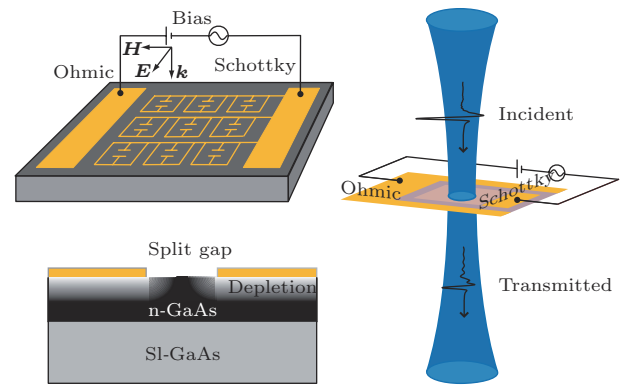


图6 基于二维金属超材料结构的SBD THz探测器示意图<sup>[8]</sup>  
Fig. 6. Schematic diagram of two-dimensional metamaterial coupled SBD THz detector<sup>[8]</sup>.

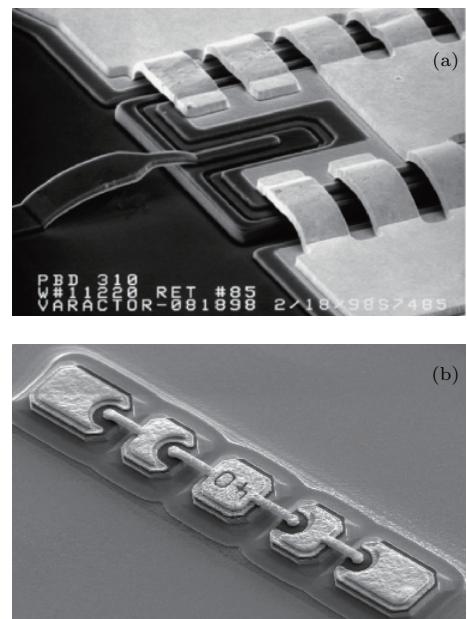


图7 THz SBD显微照片 (a) 空气桥结构的SBD; (b) SBD阵列芯片<sup>[34]</sup>  
Fig. 7. Photographs of (a) a bridged SBD and (b) a four-SBD chip arrayed in a balanced configuration<sup>[34]</sup>.

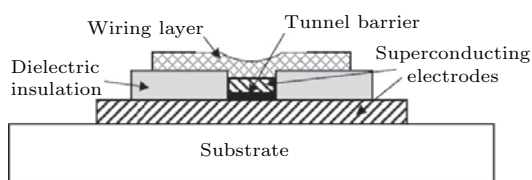


图8 SIS混频器截面示意图 [33,34]

Fig. 8. Schematic diagram of a typical SIS junction cross section [33,34].

与SBD和SIS混频器不同,HEB是一种热探测器.用作混频器的测辐射热仪(Bolometer)必须有超快的响应,混频过程总的时间常数最多只有几十皮秒.目前,只有InSb HEB [55]和SHEB的带宽足够宽,可以用于外差探测和对THz电磁波的直接探测 [56].SHEB的带宽有几千兆赫兹,是THz频段最常用的HEB混频器,在原理上与HEB非常相似.HEB的响应速度由热容 $C$ 和热导 $G$ 的比值决定,因此要想让HEB的响应时间足够短,就需要HEB材料的热导足够高,热容足够小 [57].当SHEB混频器吸收入射光能量后,很小的温度变化量就会引起超导体阻值很大的变化另外,入射光能量由超导体中的电子直接吸收,而不是像普通的HEB一样经过分立的辐射器吸收,这就是SHEB具有超快响应速度的原因.SHEB的工作原理如图9所示 [34],超导体中的单个电子接收到一个能量为 $h\nu$ 的光子后,其温度迅速增加,其他的电子也会经历同样的

吸收过程,从而使整个超导体的阻值发生变化,并通过电子-电子扩散与电子-声子相互作用快速释放能量,实现对入射光的超快探测.

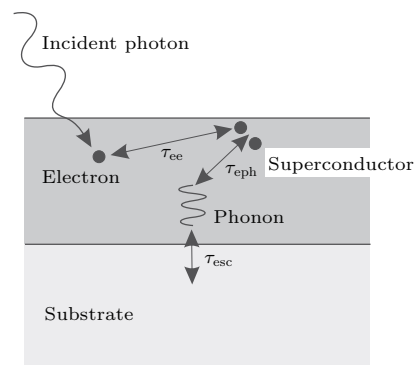


图9 SHEB实现超快探测的原理示意图 [34]

Fig. 9. Schematic diagram of SHEB principles [34].

基于高迁移率二维电子气的天线耦合FET也具有高速探测的应用潜质.与双极型FET相比,石墨烯FET(graphene FET, GFET)可以在空穴沟道或电子沟道条件下工作,因此具有很宽的栅极电压范围.此外,GFET的费米能级可以在石墨烯生长或器件工艺制作前进行预先设计,从而使其可以在不需要任何栅极电压的条件下实现两端探测 [58].Qin等 [59]利用如图10所示的低阻抗、高灵敏度的常温THz GFET探测器 [58]实现了THz波的外差探测,二次谐波探测的中频带宽达到1 GHz.

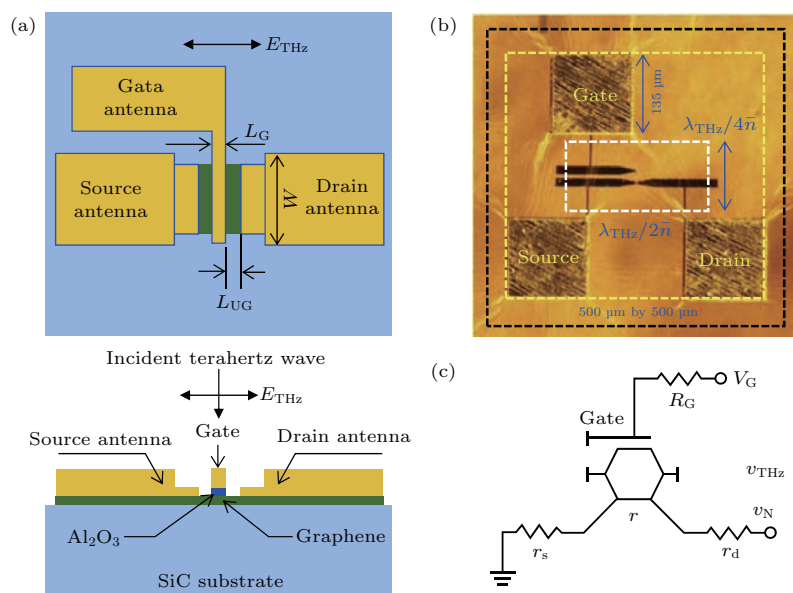


图10 (a) 天线耦合的双层GFET结构示意图; (b) GFET探测器的光学显微照片; (c) GFET探测器的等效电路图 [58]

Fig. 10. (a) Schematic of the antenna-coupled GFET terahertz detector; (b) optical micrograph of the GFET detector; (c) circuit diagram of the GFET detector [58].

## 4 THz QWP

THz QWP 是一种基于子带间跃迁的单极器件, 具有较高的响应速率, 非常适合高频和高速的探测应用<sup>[60]</sup>. THz QWP 的有源区由多个周期的量子阱组成, 每个周期包含一层掺杂的 GaAs 材料(量子阱层) 和一层 AlGaAs 材料(势垒层). THz QWP 的探测原理为: 当 THz 波入射到器件的光敏面时, 位于量子阱中的束缚电子吸收光子能量后跃迁到接近势垒边的准连续态, 这些光生载流子在外加偏压的作用下形成光电流, 通过测量光电流信号的变化就可以实现对 THz 光的探测. 通过调节有源区的势垒高度、量子阱宽度以及材料的掺杂浓度等参数可以设计不同峰值响应频率的 QWP 器件<sup>[61]</sup>. 然而, 由于多体效应的影响<sup>[62]</sup>, THz QWP 的掺杂浓度一般较低, 导致光吸收效率较小, 限制了器件的高频应用. 在理论方面, 研究多量子阱中的载流子动力学输运过程对抑制器件的暗电流具有重要意义<sup>[63-67]</sup>. 另外, 为了提高 QWP 的响应率, 人们一直在积极探索新的耦合方式. 例如: 一维或二维金属衍射光栅耦合<sup>[16]</sup>, 微纳结构谐振腔耦合<sup>[68,69]</sup>, 以及表面等离子极化激元耦合<sup>[70-72]</sup>等. 通过优化理论设计参数及改善工艺条件, THz QWP 器件的性能已经有了大幅提高<sup>[73,74]</sup>.

THz QWP 是一种窄带探测器, 其具有较强的光谱分辨本领, 在某些应用中不需要滤光片<sup>[75]</sup>. 目前已证明, 中红外 QWIP 的响应速率高达几十吉赫兹<sup>[76]</sup>. 2010 年, 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室的曹俊诚课题组首次利用连续工作模式的 THz 量子级联激光器(QCL) 作为发射源, THz QWP 作为接收器, 实现了音频信号的 THz 无线传输, 系统带宽约为 580 kHz, 传输频点为 4.1 THz, 传输距离为 2 m<sup>[77]</sup>.

2017 年, Li 等<sup>[78]</sup> 对 THz QWP 结构进行了优化, 采用基于微带线的高速封装, 实现了 6.2 GHz 调制带宽的高速 THz QWP. 在该实验中, THz QWP 采用 45° 角台面结构, 并采用特性阻抗为 50 Ω 的微带线封装, 用于提取高速调制信号. 为了验证 THz QWP 的高速响应特性, 采用 THz QCL 作为抽运光, 如图 11(a) 所示<sup>[78]</sup>. THz QCL 在连续波模式下工作, 其腔长为 6 mm, 对应的往返频率为

6.2 GHz. 当 THz QCL 器件处于多纵模激射情况时, 所发射的 THz 光是被调制的, 调制频率即为往返频率 6.2 GHz. THz QCL 在探测器端面的光斑如图 11(a) 左下插图所示, 光斑直径约 300 μm. 为了保证 THz QWP 能够完全接收全部 THz 光, 采用的器件台面尺寸为 400 μm × 400 μm, 如图 11(a) 的右上插图所示. 高速调制的 THz 光入射到 THz QWP 之后会转化成光电流, 该电流也是被高速调制的. 为了检测调制包络, 采用了 40 GHz 调制带宽的 Bias-T (T 型偏置器), 之后采用低噪声放大器对信号进行放大, 最后在频谱分析仪上进行信号测量. 图 11(b) 为测量结果, 其中上图为 THz QCL 的激光发射谱和 THz QWP 的光响应谱, 可以看出 THz QCL 处于多纵模工作模式, 激光器和探测器的波长完全匹配. 图 11(b) 左下图为采用 THz QWP 测量得到的 THz 光调制频率 6.2 GHz, 该结果表明 THz QWP 的响应带宽达到 6.2 GHz, 可实现高速探测, 同时 THz QWP 可以被用作 THz 混频器. 基于该方法, 可以采用 THz QWP 对 THz QCL 的模式稳定性进行全光学测量, 如图 11(b) 右下图所示. 进一步, 基于该方法, Zhou 等<sup>[79]</sup> 成功实现了基于 THz QWP 混频器的成像. 该成像技术的主要优势是可以将 THz 光下转换到微波波段, 从而采用成熟的微波信号放大、滤波等技术进行高质量的成像.

在 THz 波段, 将体积超小的线性双面金属-介质微腔与不同类型的探测器结合, 可以克服材料本身的载流子动力学缺陷, 使器件实现超快的响应<sup>[80]</sup>. Shackleford 等<sup>[81]</sup> 在金属-半导体-金属结构的光探测器上接触层表面制作了纳米尺度的金属光栅, 这种结构使入射光子以表面等离子体极化激元的方式进入到器件中, 增加了入射光通量, 增强了器件的光电流, 从而提高了器件的响应率和响应速度. Todorov 等用模式方法(modal method, 一种专门研究自由站立层状金属光栅及相关周期性结构的理论方法<sup>[82]</sup>) 对表面具有周期性金属光栅的金属-介质-金属结构的光学特性进行了系统的研究, 并制作出了基于以上金属微腔结构的 THz 频段探测器<sup>[83]</sup>. 从光栅法向正入射的光被耦合入金属微腔中(不同的几何和材料参数决定不同的共振频率), 光的偏振方向被有效地改变从而顺应了子带间跃迁选择定则, 其理论和实验充分证明了金属微腔耦合结构器件的子带间吸收效率明显增强<sup>[84,85]</sup>.

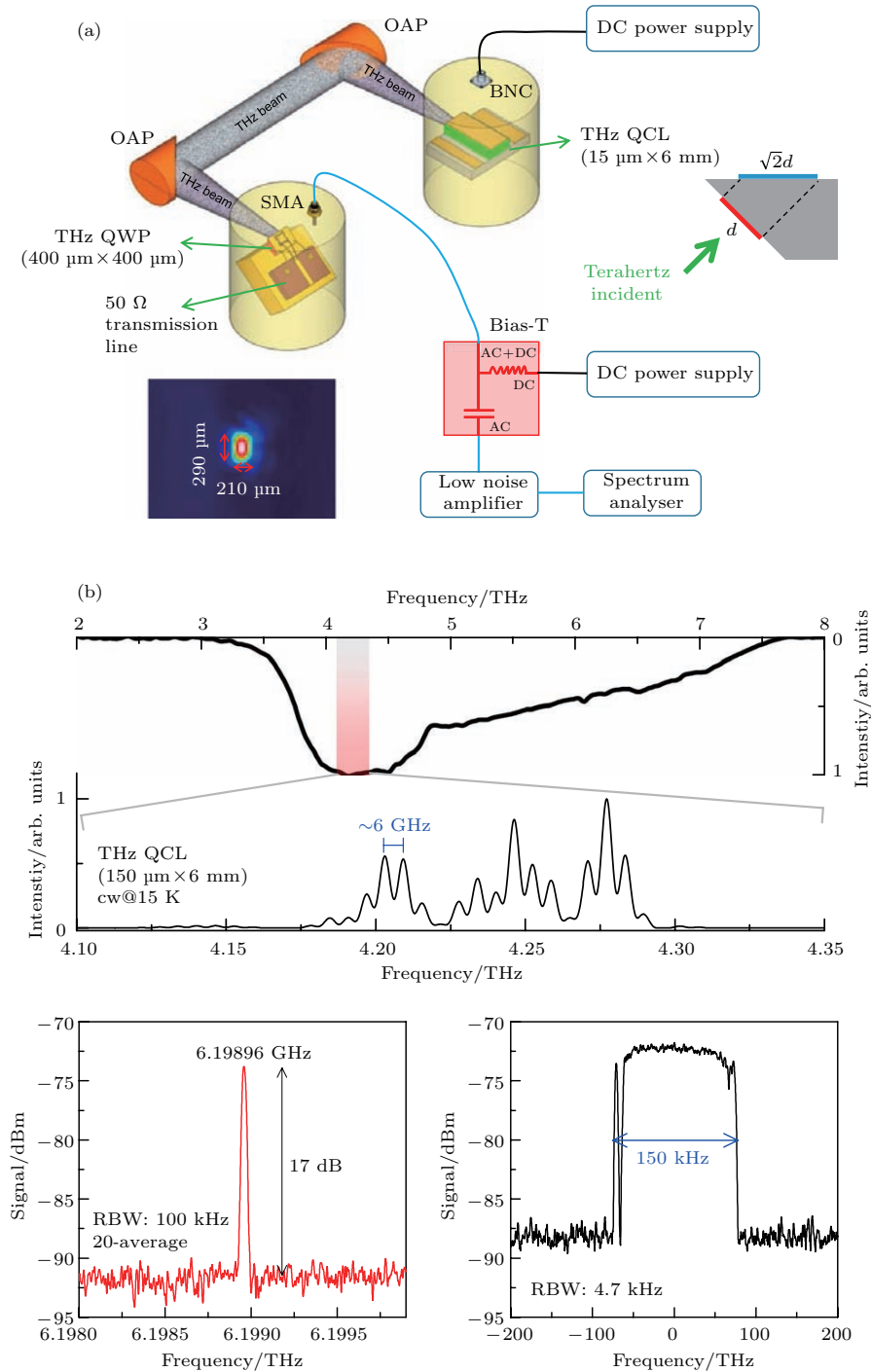


图 11 (a) THz QWP 高速调制实验装置; (b) THz 波的快速探测结果 [78,79]

Fig. 11. (a) Experimental setup of the fast terahertz detection using a microwave transmission line equipped terahertz QWP; (b) fast detection of terahertz light [78,79].

通过在表面制作不同的微纳结构来提高器件工作温度、耦合效率和响应速度等技术指标,是近年来 THz QWP 研究的热门领域 [82,85-87]. Paulillo 等 [88] 报道了一个工作波长为 100 μm (3 THz) 的三维开口环结构高速 QWP 探测器,如图 12(a) 所示,每一个单元都是一个开口环形天线,将 THz 辐射馈入体积约为 20 μm<sup>3</sup> 的有源区内. 开口环结构

的微型谐振腔可看作一个亚波长的 LC 振荡电路,半导体有源区可看作微米尺寸的电容器. 除了固有的较短的 RC 时间常数外,共振 LC 几何结构也给了光学谐振腔很多的设计自由度,例如: 可以通过临界耦合和自由空间的阻抗匹配来设计损耗与辐射的耦合; 通过外部辐射源来调制探测器的频率; 通过设计天线来选择吸收方向等. 该阵列结构每个



圆环的直径只有  $4\ \mu\text{m}$ , 约为探测波长 ( $2\text{--}4\ \text{THz}$ ) 的  $1/25$ . 阵列的表面积为  $350\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ , 包含 300 个微腔单元, 探测器的暗电流在纳安量级, 光学响应速度约为  $3\ \text{GHz}$ . 通过对该微腔阵列探测器的射频响应测试 (结果如图 12 (b) 所示), 表明器件可以工作在至少  $2.5\ \text{GHz}$  的高速调制速度下.

亚波长双面金属介质微腔结构的优点有两个: 第一, 可以增加表面有效光吸收区域的天线效应; 第二, 亚波长的双面金属结构可以将光限制在一个很小的体积范围内, 腔的模式与 QWP 峰值响应频率达到很好的共振吸收, 使得光与 QWP 有源区发

生很强的相互作用 [82]. 为了量化分析两个特性, 可以引入两个物理量: 天线的收集面积  $A_{\text{coll}}$  和聚焦因子  $F$  [89]. 这两个量只与结构的几何参数有关, 可以用来优化任何探测器有源区的性能 [90]. 在微腔阵列中, 每个谐振腔的有效光子收集区域  $A_{\text{coll}}$  都比本身的几何面积大, 从而在很大程度上提高了有源区的光吸收效率, 有效减小了器件的暗电流 (暗电流与器件台面的几何尺寸有关), 使得这种微腔阵列结构对提高 THz 探测器的工作温度具有巨大的潜力.

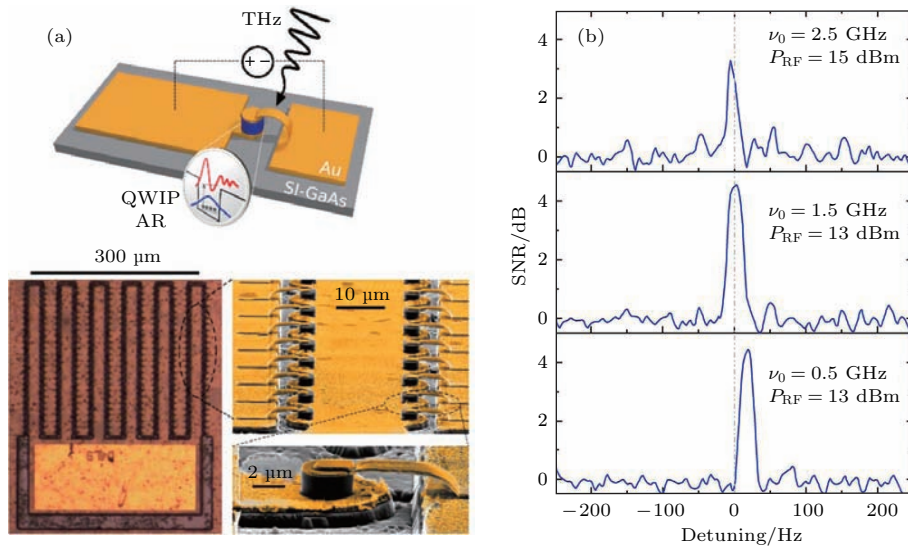


图 12 (a) 亚波长 meta-atom THz 探测器示意图 (上图为单个微腔 QWP 探测器的示意图; 下图左侧为微腔阵列的几何结构的扫描电子显微镜照片, 右侧上图为一个阵列, 右侧下图为单个微腔); (b) 分别在带宽为 0.5, 1.5 和 2.5 GHz 的速率下, 用 QCL 驱动的 THz QWP 微腔阵列的射频响应 [88]

Fig. 12. (a) Schematic diagram of the sub-wavelength meta-atom detector (top), optical microscopy image of the meta-atoms arranged in array geometry (bottom left panel), scanning electron microscopy picture of the same array (bottom right top panel) and close view of a single meta-atom (bottom right bottom panel); (b) normalized radio-frequency spectra acquired when the QCL is driven at 0.5, 1.5, and 2.5 GHz [88].

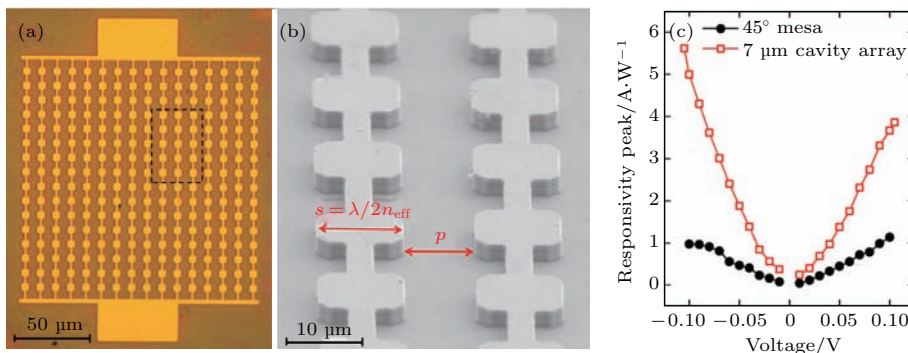


图 13 (a) 贴片天线微腔阵列结构的 THz QWP 显微照片; (b) 微腔阵列的扫描电子显微镜照片及几何参数示意图; (c)  $45^\circ$  斜面耦合 QWP 和微腔 QWP 的响应率与电压关系图 [90]

Fig. 13. (a) Optical microscope of THz QWP; (b) scanning electron microscopy images of cavity array detector with indications of the main parameters of the array; (c) responsivity peak vs voltage for the  $45^\circ$  mesa QWP and micro-cavity array QWP [90].

巴黎第七大学的 Todorov 课题组 [82,84,89,91,92] 一直致力于亚波长光学微腔结构的 THz 近场增强效应的研究. 2014 年, 基于微腔天线阵列的探测波长为 9  $\mu\text{m}$  的中红外 QWIP 研制成功, 将 QWIP 的 BLIP 工作温度提高了 10 K [92]. 2015 年, Palaferri 等 [90] 报道了一个峰值探测频率为 5 THz 的贴片天线微腔阵列耦合的 QWP. 贴片天线的宽度和长度的设计保证了基本的电磁波  $\text{TM}_{100}/\text{TM}_{010}$  腔模与 QWP 子带间跃迁能量发生共振. 微腔的腔模可表示为:  $\nu = c/2sn_{\text{eff}}$ , 其中  $c$  为真空中的光速,  $s$  为微腔单元的尺寸 (如图 13(b) 所示),  $n_{\text{eff}}$  为半导体材料的有效折射率 [82]. 将微腔耦合结构的 QWP (如图 13(a) 所示) 与  $45^\circ$  抛光台面结构做对比, 可以看出响应率峰值提高了数倍 (图 13(c)). 2017 年, 该课题组报道了一种基于微腔结构的室温工作的红外 QWIP 外差探测器, 用两个 QCL 拍频, 得到了 4 GHz 带宽的外差信号 [93]. 亚波长双面金属介质微腔结构的 QWP 在响应率、非极化灵敏度和 BLIP 工作性能上都有很大的提升.

## 5 结 论

THz 高速探测器是高速空间通信及大规模快速成像应用的核心部件: THz 宽带光导天线具有超快的响应速度和下降时间, 非常适合快速成像成谱应用, 双面金属圆形微腔结构的 THz 光导天线混频器, 可突破 RC 电路寄生电容电阻对器件高频应用的限制, 改善经典平面结构光导天线在高频应用中的性能. 室温工作的 SBD 作为混频器可响应 THz 光, 其中频带宽可达到 40 GHz, 主要缺点是需要毫瓦量级的本征振荡信号. SHEB 是一种低温探测器, 灵敏度高, 原则上可实现单光子探测, 但是其中频带宽最宽只能达到几个吉赫兹. 新型的高迁移率二维电子 GFET 可实现 THz 波与等离激元的共振增强, 设计自由度和集成度高, 是高速常温探测应用中非常有潜力的器件. THz QWP 的响应率高、相应速度快, 且紧凑易集成, 目前已实现 6.2 GHz 的中频带宽, 采用微腔技术有望实现更高的探测速度.

本文列出的多种高速 THz 探测器在响应频段、工作温度、灵敏度、中频带宽等参数上各有优缺点. 为了满足多元化的应用需求, 将来高速 THz 探测器的发展趋势可能是多种不同高速探测器的集成. 另

外, 为了追求更高的中频带宽, 往往需要采用更小的器件探测单元, 这一方面会增大器件工艺难度, 另一方面器件变小之后必然会导致响应灵敏度变差 (由于 THz 光斑较大). 综上所述, 在高速 THz 探测器的研究上还有很多物理和技术上的难题有待进一步地研究与开发.

## 参考文献

- [1] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Mater.* **1** 26
- [2] Cao J C 2012 *Semiconductor Terahertz Sources, Detectors and Applications* (Beijing: Science Press) pp1-7 (in Chinese) [曹俊诚 2012 半导体太赫兹源、探测器与应用 (北京: 科学出版社) 第 1—7 页]
- [3] Federici J F, Schulkin B, Huang F, Gary D, Barat R, Oliveira F, Zimdars D 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** S266
- [4] Zheng X, Wu Z M, Gou J, Liu Z J, Wang J, Zheng J, Luo Z F, Chen W Q, Que L C, Jiang Y D 2016 *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **37** 965
- [5] Yen T J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N, Zhang X 2004 *Science* **303** 1494
- [6] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, Lee M, Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 107401
- [7] Azad A K, Dai J M, Zhang W L 2006 *Opt. Lett.* **31** 634
- [8] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, Gossard A C, Taylor A J, Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [9] Gol'tsman G N 1999 *Infrared Phys. Technol.* **40** 199
- [10] Qin H, Huang Y D, Sun J D, Zhang Z P, Yu Y, Li X, Sun Y F 2017 *Chin. Opt.* **10** 51 (in Chinese) [秦华, 黄永丹, 孙建东, 张志鹏, 余耀, 李想, 孙云飞 2017 中国光学 **10** 51]
- [11] Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, Lombardo A, Ferrarri A C, Knap W, Polini M, Pellegrini V, Tredicucci A 2012 *Nat. Mater.* **11** 865
- [12] Sun J D, Qin H, Lewis R A, Sun Y F, Zhang X Y, Cai Y, Wu D M, Zhang B S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 173513
- [13] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J, Cao J C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4068
- [14] Liu H C, Luo H, Song C Y, Wasilewski Z R, SpringThorpe A J, Cao J C 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 374
- [15] Guo X G, Cao J C, Zhang R, Tan Z Y, Liu H C 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 8500508
- [16] Zhang R, Guo X G, Cao J C, Liu H C 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 073110
- [17] Guo X G, Zhang R, Cao J C, Liu H C 2012 *IEEE J. Quantum Electron.* **48** 1113
- [18] Schneider H, Liu H C 2006 *Quantum Well Infrared Photodetectors: Physics and Applications* (Berlin: Springer) pp67-69
- [19] Wu W, Bonakdar A, Mohseni H 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 161107

- [20] Liu H C, Capasso F 2000 *Intersubband Transition in Quantum Wells: Physics and Device Applications I* (San Diego: Academic Press)
- [21] Auston D H 1975 *Appl. Phys. Lett.* **26** 101
- [22] Lefur P, Auston D H 1976 *Appl. Phys. Lett.* **28** 21
- [23] Valdmanis J A, Mourou G, Gabel C W 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 211
- [24] Jepsen P U, Jacobsen R H, Keiding S R 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 2424
- [25] Shi W, Hou L, Wang X M 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 023111
- [26] Chen S G, Shi W, Hou L, Lewis R A 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **23** 8400406
- [27] Tani M, Hirota Y, Que C T, Tanaka S, Hattori R, Yamaguchi M, Nishizawa S, Hangyo M 2006 *Int. J. Infrared Millim. Waves* **27** 531
- [28] Grischkowsky D, Keiding S, Vanexter M, Fattinger C 1990 *J. Opt. Soc. Am. B* **7** 2006
- [29] Hu B B, Nuss M C 1995 *Opt. Lett.* **20** 1716
- [30] Beard M C, Turner G M, Schmittenmaer C A 2002 *J. Phys. Chem. B* **106** 7146
- [31] Xu L, Zhang X C, Auston D H 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 1784
- [32] Hu Y, Huang P, Guo L T, Wang X H, Zhang C L 2006 *Phys. Lett. A* **359** 728
- [33] Hubers H W 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 378
- [34] Rogalski A, Sizov F 2011 *Opto-Electron. Rev.* **19** 346
- [35] McIntosh K A, Brown E R, Nichols K B, McMahon O B, DiNatale W F, Lyszczarz T M 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 3844
- [36] Peytavit E, Coinon C, Lampin J F 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 016101
- [37] Peytavit E, Lampin J F, Hindle F, Yang C, Mouret G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 161102
- [38] Englert C R, Schimpf B, Birk M, Schreier F, Krocka M, Nitsche R G, Titz R U, Summers M E 2000 *J. Geophys. Res. Atmos.* **105** 22211
- [39] Pickett H M 2006 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44** 1122
- [40] Gulkis S, Allen M, Backus C, Beaudin G, Biver N, Bockelee-Morvan D, Crovisier J, Despois D, Encrenaz P, Frerking M, Hofstadter M, Hartogh P, Ip W, Janssen M, Kamp L, Koch T, Lellouch E, Mann I, Muhleman D, Rauer H, Schloerb P, Spilker T 2007 *Planet Space Sci.* **55** 1050
- [41] Siegel P H, Dengler R J 2006 *Int. J. Infrared Millim. Waves* **27** 465
- [42] Crowe T W, Mattauich R J, Roser H P, Bishop W L, Peatman W C B, Liu X L 1992 *Proc. IEEE* **80** 1827
- [43] Zmuidzinas J, Richards P L 2004 *Proc. IEEE* **92** 1597
- [44] Bozhkov V G 2003 *Radiophys. Quant. Electron.* **46** 631
- [45] Champlin K S, Eisenstein G 1978 *IEEE Trans. Microw. Theory* **26** 31
- [46] Hubers H W, Schwaab G W, Roser H P 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 4243
- [47] Crowe T W, Porterfield D W, Hesler J L, Bishop W L, Kurtz D S, Hui K (Hwu R J, Woolard D L Rosker M J ed.) 2005 *Terahertz for Military and Security Applications III* (Vol. 5790) (Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering) pp271–280
- [48] Young D T, Irvin J C 1965 *Proc. IEEE* **53** 2130
- [49] Ishi T, Fujikata J, Makita K, Baba T, Ohashi K 2005 *Jpn. J. Appl. Phys.* **44** L364
- [50] Tien P K, Gordon J P 1963 *Phys. Rev.* **129** 647
- [51] Uzawa Y, Wang Z, Kawakami A 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 680
- [52] Karpov A, Miller D, Rice F, Stern J A, Bumble B, Leduc H G, Zmuidzinas J 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercon.* **17** 343
- [53] Gaidis M C, Leduc H G, Mei B, Miller D 1996 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **44** 1130
- [54] Kawamura J, Miller D, Chen J, Zmuidzinas J, Bumble B, Leduc H G, Stern J A 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 2119
- [55] Phillips T G, Jefferts K B 1973 *Rev. Sci. Instrum.* **44** 1009
- [56] Ren Y A, Miao W, Yao Q J, Zhang W, Shi S C 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 010702
- [57] Richards P L 1994 *J. Appl. Phys.* **76** 1
- [58] Qin H, Sun J D, Liang S X, Li X, Yang X X, He Z H, Yu C, Feng Z H 2017 *Carbon* **116** 760
- [59] Qin H, Sun J D, He Z Z, Li X X, Li X, Liang S X, Yu C, Feng Z H, Tu X C, Jin B B, Chen J, Wu P H 2017 *Carbon* **121** 235
- [60] Cao J C 2006 *Physics* **35** 953 (in Chinese) [曹俊诚 2006 物理 **35** 953]
- [61] Zhang S, Wang T M, Hao M R, Yang Y, Zhang Y H, Shen W Z, Liu H C 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 194507
- [62] Guo X G, Tan Z Y, Cao J C, Liu H C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 201101
- [63] Gu L L, Guo X G, Fu Z L, Wan W J, Zhang R, Tan Z Y, Cao J C 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 111107
- [64] Ferre S, Razavipour S G, Ban D Y 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 081105
- [65] Gomez A, Berger V, Pere-Laperne N, de Vaulchier L A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 202110
- [66] Delga A, Doyennette L, Buffaz A, Berger V, Jasnot F R, de Vaulchier L A, Pere-Laperne N, Liu H C 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 013714
- [67] Guo X G, Zhang R, Liu H C, SpringThorpe A J, Cao J C 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 021114
- [68] Kippenberg T J, Vahala K J 2007 *Opt. Express* **15** 17172
- [69] Benz A, Krall M, Schwarz S, Dietze D, Detz H, Andrews A M, Schrenk W, Strasser G, Unterrainer K 2014 *Sci. Rep.* **4** 4269
- [70] Giannini V, Berrier A, Maier S A, Sanchez-Gil J A, Rivas J G 2010 *Opt. Express* **18** 2797
- [71] Harrer A, Schwarz B, Gansch R, Reininger P, Detz H, Zederbauer T, Andrews A M, Schrenk W, Strasser G 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 171112
- [72] Degl'Innocenti R, Xiao L, Jessop D S, Kindness S J, Ren Y, Lin H Y, Zeitler J A, Alexander-Webber J A, Joyce H J, Braeuninger-Weimer P, Hofmann S, Beere H E, Ritchie D A 2016 *ACS Photon.* **3** 1747

- [73] Zhang Z Z, Fu Z L, Guo X G, Cao J C 2018 *Chin. Phys. B* **27** 030701
- [74] Zhang R, Fu Z L, Gu L L, Guo X G, Cao J C 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 029902
- [75] Gu L, Tan Z Y, Cao J C 2013 *Physics* **42** 695 (in Chinese) [顾立, 谭智勇, 曹俊诚 2013 物理 **42** 695]
- [76] Grant P D, Dudek R, Buchanan M, Wolfson L, Liu H C 2005 *Infrared Phys. Technol.* **47** 144
- [77] Chen Z, Tan Z Y, Han Y J, Zhang R, Guo X G, Li H, Cao J C, Liu H C 2011 *Electron. Lett.* **47** 1002
- [78] Li H, Wan W J, Tan Z Y, Fu Z L, Wang H X, Zhou T, Li Z P, Wang C, Guo X G, Cao J C 2017 *Sci. Rep.* **7** 3452
- [79] Zhou T, Li H, Wan W J, Fu Z L, Cao J C 2017 *AIP Adv.* **7** 105215
- [80] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
- [81] Shackelford J A, Grote R, Currie M, Spanier J E, Nabet B 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 083501
- [82] Strupiechonski E, Xu G, Brekenfeld M, Todorov Y, Isaac N, Andrews A M, Klang P, Sirtori C, Strasser G, Deg-iron A, Colombelli R 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 131113
- [83] Feuillet-Palma C, Todorov Y, Steed R, Vasanelli A, Biasiol G, Sorba L, Sirtori C 2012 *Opt. Express* **20** 29121
- [84] Todorov Y, Minot C 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 3100
- [85] Todorov Y, Toso L, Teissier J, Andrews A M, Klang P, Colombelli R, Sagnes I, Strasser G, Sirtori C 2010 *Opt. Express* **18** 13886
- [86] Collin S, Pardo F, Pelouard J L 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1521
- [87] Collin S, Pardo F, Teissier R, Pelouard J L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 194
- [88] Paulillo B, Pirotta S, Nong H, Crozat P, Guilet S, Xu G, Dhillon S, Li L H, Davies A G, Linfield E H, Colombelli R 2017 *Optica* **4** 1451
- [89] Feuillet-Palma C, Todorov Y, Vasanelli A, Sirtori C 2013 *Sci. Rep.* **3** 1361
- [90] Palaferri D, Todorov Y, Chen Y N, Madeo J, Vasanelli A, Li L H, Davies A G, Linfield E H, Sirtori C 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 161102
- [91] Palaferri D, Todorov Y, Mottaghizadeh A, Frucci G, Biasiol G, Sirtori C 2016 *New J. Phys.* **18** 113016
- [92] Chen Y N, Todorov Y, Askenazi B, Vasanelli A, Biasiol G, Colombelli R, Sirtori C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 031113
- [93] Palaferri D, Todorov Y, Bigioli A, Mottaghizadeh A, Djamal G, Calabrese A, Vasanelli A, Li L, Giles Davies A, Linfield E, Kapsalidis F, Beck M, Faist J, Sirtori C 2017 arXiv: 1709.01898 [physics.app-ph]

## REVIEW

## Ultrafast terahertz detectors\*

Zhang Zhen-Zhen<sup>1)2)</sup> Li Hua<sup>1)†</sup> Cao Jun-Cheng<sup>1)‡</sup>

1) (*Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 30 January 2018; revised manuscript received 7 March 2018 )

## Abstract

Terahertz (THz) technologies have broad application prospects in ultrafast space communication, heterodyne detection, biological detection, non-destructive testing and national security. Ultrafast THz detectors, which can respond to the THz light with modulation rate larger than 1 GHz, are the key component of fast imaging, space communication, ultrafast spectroscopy and THz heterodyne applications. Theoretically, the traditional THz detectors based on heat effects are difficult to meet the requirements for fast detections, while the semiconductor based THz detectors can work under the condition of ultrafast detection. Photoconductive antennas with ultrafast response time are suitable for room-temperature broad-spectrum THz detections. Schottky barrier diodes, superconductor-insulator-superconductor mixers and hot electron bolometers are promising candidates for high-speed THz spatial heterodyne and direct detections attributable to their high conversion efficiency and low noise. High-mobility field effect transistors based on two-dimensional graphene material have the advantages of high sensitivity and low impedance, which make this kind of device have great potential applications in room-temperature high-speed detections. THz quantum well detectors (THz QWPs) based on inter-subband transitions are very suitable for the applications in high-frequency and high-speed detections because of the advantages of high responsivity, small value and integrated packaging. Recently, we have demonstrated 6.2 GHz bandwidth modulation by using THz QWPs, the fast THz receiving device. On the other hand, low working temperature and low coupling efficiency are the main factors that restrict the applications of THz QWPs. From the Brewster angle, 45° polished facet coupling structure, to one- or two-dimensional metal grating and surface Plasmon polariton coupling configuration, researchers often explore the appropriate coupling mechanism which can not only couple the normal incidence THz light, but also improve the coupling efficiency substantially. The sub-wavelength double-metal micro-cavity array coupling structure has two advantages which make THz QWPs a key candidate for fast imaging and detection in THz band: firstly, the patch antennas on the device surface can effectively increase the light absorption region, and the periodic structure can make the normal incidence THz light fulfill the rule of intersubband transition. Secondly, the sub-wavelength size double metal structure can restrict the light within a very small volume, and the electric current will be enhanced by the resonance effect when the cavity mode is equal to the peak response frequency, which can suppress the dark current and improve the optical coupling efficiency of the device. In this paper, several ultrafast THz detectors are reviewed and the advantages and disadvantages of various detectors are also analyzed.

**Keywords:** terahertz, ultrafast detection, mixers, quantum well photodetectors

**PACS:** 07.20.Mc, 73.21.-b, 85.60.Gz

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180226

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB339803), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFF0106302), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575214, 61405233, 61404150), and the “Hundred Talents Program” of Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: [hua.li@mail.sim.ac.cn](mailto:hua.li@mail.sim.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [jccao@mail.sim.ac.cn](mailto:jccao@mail.sim.ac.cn)