

太赫兹量子阱探测器研究进展

张真真¹, 符张龙¹, 王长^{1,2}, 曹俊诚^{1,2*}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 太赫兹固态技术实验室, 上海 200050;
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要: 太赫兹量子阱探测器具有皮秒级的响应时间和 1 GHz 以上的高速调制性能, 是太赫兹快速成像和高速无线通信应用领域非常有前景的探测器。文章综述了太赫兹量子阱探测器的探测原理和设计方法、器件主要性能指标和基于该探测器的应用技术研究进展。研究表明, 基于太赫兹量子阱探测器的快速成像系统可以获得物体的细节信息, 有望用于安全检查和无损检测领域; 太赫兹量子阱探测器还可用于高速无线通信的探测端, 为未来 6G 高速无线通信应用提供了有效的技术途径。

关键词: 太赫兹量子阱探测器; 太赫兹量子级联激光器; 太赫兹通信; 太赫兹成像
中图分类号: O43 **文献标识码:** A

Research on terahertz quantum well photodetector

ZHANG Zhen-Zhen¹, FU Zhang-Long¹, WANG Chang^{1,2}, CAO Jun-Cheng^{1,2*}

(1. Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Terahertz quantum well photodetectors (THz QWPs) are ultra-fast devices, which have picosecond response time and more than 1 GHz modulation speed. THz QWPs have great potential applications in the field of THz fast imaging and high-speed wireless communications. This paper summarizes the principle, design, performance and recent research progress of THz QWPs. Research shows that the fast imaging system based on THz QWPs can detect the detailed information of the object, which is expected to be used in the field of safety inspection and nondestructive testing. Additionally, THz QWPs can be used as the detection end of high-speed wireless communication, providing an effective technical approach for future 6G wireless communications.

Key words: terahertz quantum well photodetectors, terahertz quantum cascade lasers, terahertz communication, terahertz imaging

引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是频率在 0.3~10 THz 之间的电磁波, 在电磁波谱中位于红外和微波之间。THz 波以其独特的光学特性, 在生物医学成像^[1]、超快光谱学^[2]、毒品爆炸物检测^[3]、太空遥感探测^[4,5]等领域, 都有非常广泛的应用前景。近十年来, 高性能 THz 发射源得到了广泛的发展, 其中具有代表性的包括大功率 THz 量子级联激光器 (Quan-

tum Cascade Laser, QCL)^[6-9]、超宽带光导天线 (Photoconductive Antenna, PA)^[10,11]、单行载流子二极管 (Uni-Traveling-Carrier PhotoDiode, UTC-PD)^[12] 等。在探测器方面, 红外波段已经开发了很多比较成熟的高性能探测器。例如, 基于碲镉汞材料的大规模焦平面成像探测器早已实现商用化^[13], 双面金属微腔红外量子阱探测器已实现室温工作^[14], 新型的 GeSn 中红外光电探测器有望实现与 CMOS 兼容^[15]

收稿日期: 2021-11-17, 修回日期: 2021-12-15

Received date: 2021-11-17, Revised date: 2021-12-15

基金项目: 国家自然科学基金 (61927813, 61975225, 62005304, 62035014, 62004209)、上海市科学技术委员会 (21DZ1101102) 资助项目。

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61927813, 61975225, 62005304, 62035014, 62004209) and Science and Technology Commission of Shanghai Municipal (21DZ1101102).

作者简介 (Biography): 张真真 (1984—), 女, 河南郑州人, 副研究员, 博士学位, 主要研究领域为太赫兹量子阱探测器及其应用技术。E-mail: zzzhang@mail.sim.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

等等。THz 波段在电磁波谱中是远红外波段的拓展,该波段的探测器在光谱检测、外差探测和无线通信领域也有良好的表现^[1, 16-18]。例如:常温超宽带探测的 PA 可用于 THz 时域光谱系统(Time Domain System, TDS)^[19],实现对毒品和爆炸物特征谱的检测;基于电子学原理的肖特基二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)探测器与 UTC-PD 相结合,可以制作准光学模块,是未来 6G 高速无线通信链路的基础^[20];基于氮化铍材料的超导热电子热辐射计(Superconductive Hot Electron Bolometer, SHEB)可以实现对 THz 波的直接和外差探测^[21];基于石墨烯材料的常温场效应晶体管(Graphene Field Effect Transistors, GFET)用于 THz 外差探测可以实现 1 GHz 以上中频带宽^[22]等等。基于光子学原理的 THz 量子阱探测器(Quantum Well Photodetector, QWP)具有体积小、易集成、响应速度快和灵敏度高优点,是 THz 大规模焦平面成像的理想器件。THz QWP 与大功率 THz QCL 相结合,可以实现 THz 波的快速成像和高速通信。本文主要阐述 THz QWP 的基本原理和优化设计、主要性能指标以及最新研究进展。

1 THz QWP 的原理和设计

THz QWP 是量子阱红外探测器(Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)在 THz 波段的自然扩展^[23],具有与红外 QWIP 相类似的高速探测性能,调制带宽可以达到几十 GHz^[24],非常适合用于 2~7 THz 频谱范围内的高速探测。THz QWP 是一种基于子带间跃迁原理的单极器件,子带间跃迁选择定则要求电场在量子阱的生长方向具有非零的偏振分量,因此常规的 THz QWP 对正入射的光没有响应,一般采用衬底 45° 斜面入射的方式来耦合。THz QWP 的有源区由几十甚至上百个周期的量子阱超晶格结构组成,通常采用 GaAs/AlGaAs 材料体系。2016 年, Durmaz 等基于 GaN/AlGaN 材料,制作出峰值探测频率在 10 THz 左右的 THz QWP^[25]。此外, GeSn/SiGeSn 也是热门的候选材料之一^[26]。

在没有光照的情况下,电子被束缚在量子阱中,器件处于高阻状态;在 THz 光耦合进入器件的有源区时,量子阱中基态子带中的束缚电子吸收光子能量后被激发到第一激发态和接近势垒边缘的准连续态,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。图 1 为 THz QWP 的能带结构示意图^[27]。

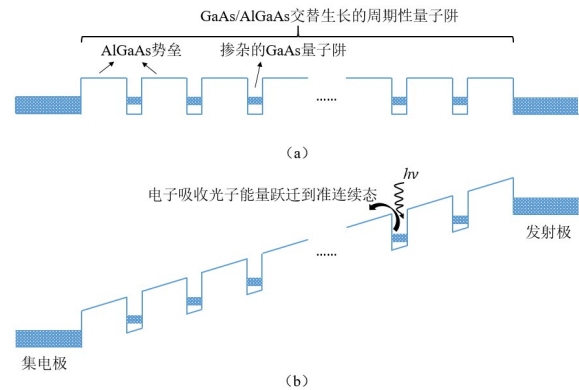


图 1 THz QWP 的能带结构示意图, (a) 零偏压下, (b) 光照加偏压的情况下^[27]

Fig. 1 The band profile schematic of THz QWPs, (a) without bias. (b) with illumination and bias^[27]

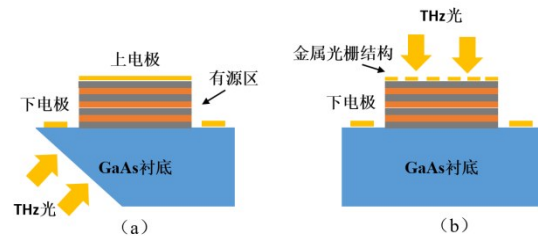


图 2 THz QWP 的两种常用耦合方式, (a) 45° 衬底背入射耦合, (b) 金属光栅正入射耦合

Fig. 2 Two common coupling methods of THz QWP, (a) 45° facet coupled THz QWP, (b) metal-grating coupled THz QWP

与红外波段 QWIP 不同的是, THz QWP 量子阱中基态和第一激发态的能量差比较小,在对器件进行精确设计和理论分析时应该考虑多体效应(Many Body Effects, MBEs)的影响^[28]。Ferre 等^[29]在理论计算中加入了多体效应的影响,设计出的 THz QWP 的吸收效率提高了 20%。Jia 等^[30]在研究暗电流时考虑了多体效应,理论证明了载流子散射隧穿暗电流对器件总的暗电流有重要贡献。郭旭光等^[31]从理论方面分析了重掺杂有源区 THz QWP 的光电流特性,证明了第二子带中光生电子的逃逸几率随量子阱中 Si 掺杂浓度的增加而减小。Zhang 等^[32]从理论和实验两方面研究了具有非对称阶梯量子阱吸收层的 THz QWP 的偏压极性相关光电流谱,证明了能带结构和波函数在 THz QWP 的光响应分析中都起着关键作用。

THz QWP 区别于红外 QWIP 的另一个重要特点是, THz QWP 有源区厚度在亚波长量级,阱中的掺杂浓度较低,光吸收效率相对较小,因此高效的光

耦合方式是提高 THz QWP 性能的关键。最早的多量子阱探测器采用布儒斯特角的入射方式^[33],目前常用的是 45° 斜面背入射的耦合方式,如图 2(a)所示。金属散射光栅耦合可以实现 THz QWP 对光的正入射^[34, 35],如图 2(b)所示。此外,在红外和 THz 波段,还有两种耦合方式备受青睐:亚波长金属微腔和表面等离子体耦合方式不仅可以增加量子阱探测器的有效光吸收面积,提高吸收效率,还可以抑制器件的暗电流,提高器件的工作温度^[14, 36-38]。2015 年, Palaferri 等^[39]报道了一个峰值探测频率为 5 THz 的 QWP,采用如图 3(a)所示的贴片天线微腔阵列耦合结构,使器件的峰值响应率与 45° 台面结构 THz QWP 相比提高了 5 倍。Harrer 等^[40]成功研制了等离子体透镜增强的单片集成红外量子级联探测器。红外辐射正入射到如图 4(c)和(d)所示的微结构表面激发表面等离子体激元耦合进入探测器的有源区。等离子体透镜耦合器将器件的光学有效吸收面积扩展到比探测器台面几何面积大 5 倍的区域,提高了器件的吸收效率和室温工作性能,实验测得的探测器在室温下的光电流响应提高了 6 倍。

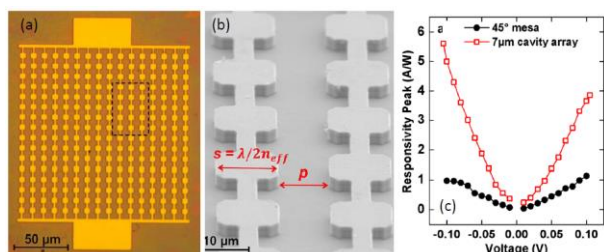


图 3 贴片天线微腔阵列结构的 THz QWP, (a) 微腔器件显微照片, (b) 微腔阵列的 SEM 照片, (c) 微腔与 45° 台面耦合 THz QWP 的峰值响应率对比^[39]

Fig. 3 The patch antenna array coupled THz QWP, (a) SEM photo of the detector, (b) responsivity peak vs voltage for the 45° mesa and the cavity array detectors^[39]

2 THz QWP 的性能

THz QWP 的性能指标主要包括暗电流随温度的变化特性、光电流响应谱、背景限工作 (Background Limited Performance, BLIP) 温度 T_{BLIP} 、响应率和探测灵敏度。与红外 QWIP 不同, THz QWP 量子阱中束缚态到连续态的能量间距非常小, 导致暗电流对温度非常敏感, 影响探测器常温工作性能。通常, 为了抑制器件暗电流, THz QWP 需要在连续制冷的液氮流下工作。光电流响应谱是研究探测光

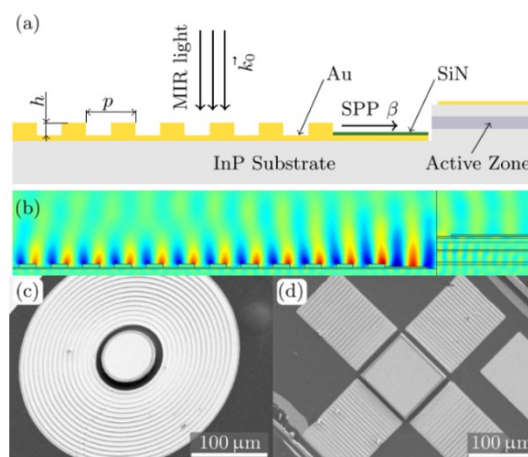


图 4 表面等离子体透镜耦合的 THz 量子级联探测器, (a) 探测器结构示意图, (b) 表面等离子体电场分布, (c) 圆形等离子体结构器件显微照片, (d) 矩形等离子体结构器件显微照片^[40]

Fig. 4 Plasmonic lens enhanced mid-infrared quantum cascade detector, (a) the schematic diagram of the detector, (b) the electric field at the grating and coupling to the detector active zone, (c) device with circular design, (d) device with star shape design^[40]

强度与频率关系的有效方法, 将测得的时域光谱进行傅里叶变换, 即可得到频域谱, 采用傅里叶变换光谱仪可以实现对器件光电流谱的测量。THz QWP 的 T_{BLIP} 是器件性能的重要指标, 它定义为暗电流和背景电流相等时器件的工作温度。 T_{BLIP} 越高, 器件受暗电流的影响越小。响应率是描述探测器性能的关键指标, 该指标可通过测量校准的黑体辐射响应率, 与器件的光电流响应谱对比, 来标定器件的峰值响应率。探测灵敏度 D^* 的值等于器件台面面积开平方与器件噪声等效功率之比。 D^* 的值越高, 器件探测性能越好。目前常规 THz QWP 的探测灵敏度可以达到 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{0.5} / \text{W}$ 。表 1 列出了近十年来报道的金属光栅耦合、45° 衬底斜面耦合、随机光栅耦合、微腔耦合、双色、宽谱电压可调谐和阵列 THz QWP 器件的部分参数和性能指标。

3 THz QWP 的应用研究进展

THz QWP 的峰值响应频率由有源区量子阱中第一和第二子带之间的能量差决定。利用分子束外生长技术和成熟的半导体加工技术可以制作 THz QWP 的大规模、均匀、高分辨率并且长期稳定的焦平面阵列成像探测器, 对实现实时成像系统具有重要的意义。周涛等^[47]基于高灵敏度的 THz

表 1 近十年来几种典型的 THz QWP 的性能指标

Table 1 The parameters of several typical THz QWPs in the last decade

峰值探测频率(THz)	耦合方式	台面面积(μm^2)	工作温度(K)	峰值响应率(A/W)	参考文献
5.85	一维金属光栅	1 000×1 000	3.2-18	0.036	[41]
4.3	45°衬底斜面	400×400	4-20	0.99	[42]
3.75, 5.55 (双色)	45°衬底斜面	1 200×1 200	4.2	-	[43]
宽谱可调谐(4.5~6.5)	一维金属光栅	1 000×1 000	4.2	1.7	[44]
5.4	随机光栅	800×800	4.2	1.3	[45]
5.4	微腔	400×400	4-23	5.5	[39]
3.5	45°衬底斜面(天线耦合阵列器件)	350×300	4.5	-	[46]

QWP搭建了透射成像系统,成功探测到了隐藏在信封中的钥匙图像,并搭建了以THz QCL为光源、THz QWP为接收器的三维THz CT系统^[48],成像装置示意图和成像结果如图5所示。

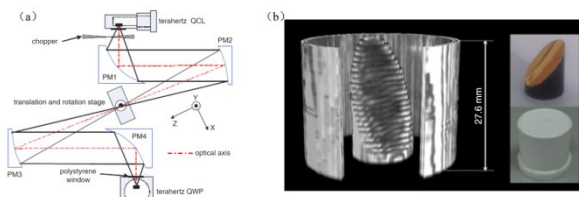


图5 THz CT成像系统示意图及成像结果, (a)THz CT成像系统示意图, (b)离轴抛物面镜 THz CT成像结果^[48]

Fig. 5 The imaging system of THz CT, (a) the schematic diagram and (b) the imaging results^[48]

邱付成等^[49]基于脉冲工作模式的4.3 THz QCL和THz QWP,搭建了THz快速扫描成像系统,在5 s内获得了不同遮蔽物(包括塑料袋和聚乙烯盖)的叶片和刀片的太赫兹图像,该系统的成像分辨率为0.3 mm,图6所示为THz快速扫描成像系统的装置示意图和扫描结果。符张龙等^[50]成功研制了基于频率上转换技术的无像素THz成像器件,图7(a)所示为器件结构示意图,器件由THz QWP和近红外发光二极管(Light Emitting Diode, LED)组成,QWP接收THz光产生的光电流驱动LED发出近红外光,将QWP-LED和商用Si相机结合,可以对物体进行微秒量级时间的单帧THz成像,图7(b)显示了THz QWP-LED的成像结果。这些成像系统的搭建显示了THz QWP应用于快速成像系统的巨大潜力。

THz QWP的光激发载流子寿命很短,具有超快的响应速度,是一种高速探测器,可用于THz高速无线通信领域。2009年,Grant等^[51]报道了基于QCL

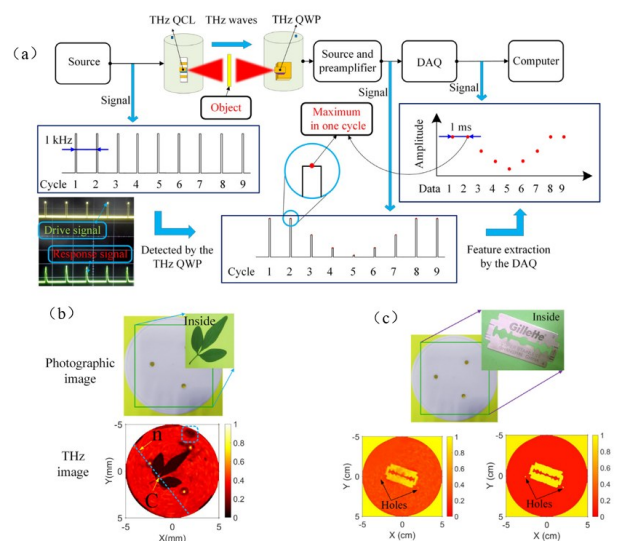


图6 THz快速扫描成像系统, (a)成像装置示意图, (b)隐蔽物体(树叶)成像结果, (c)隐蔽物体(刀片)成像结果^[49]

Fig. 6 The schematic diagram of the fast THz reflective scanning imaging system, (a) the detection method of the imaging system, (b) imaging results of the covered leaf, (c) imaging results of the covered razor blade^[49]

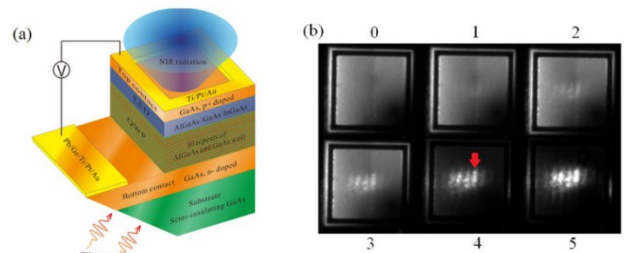


图7 THz QWP-LED频率上转换成像器件, (a)THz QWP-LED结构示意图, (b)THz QWP-LED成像结果^[50]

Fig. 7 Frequency up-conversion THz QWP-LED, (a) the schematic of the 45° facet coupled THz QWP-LED, (b) imaging results of THz QWP-LED^[50]

和 QWP 的光子型 THz 室内无线通信链路,通信频率为 3.8 THz,传输距离为 2 m。2010 年,陈镇等^[52]利用连续工作模式的 THz QCL 作为发射源,THz QWP 作为探测器,成功实现了音频信号的 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^[52]。2017 年,该系统的调制速率已经达到 0.5 GHz^[53]。Paulillo 等^[46]研制了亚波长 3D 环形天线结构的 THz QWP 阵列探测器,可在 100 μm 左右的波长下实现超快运行,阵列探测器的结构如图 9 所示,每个探测单元具有一个悬浮的环形天线,天线效应有效增加了器件的光吸收效率。这种阵列探测器具有低于 nA 水平的超低暗电流,测得的光学响应速度约为 3 GHz。黎华等^[54]对峰值探测频率为 4.3 THz 的 QWP 结构进行了优化,采用基于微带线的高速封装方式,实现了 6.2 GHz 高速调制带宽,证明了 THz QWP 器件 GHz 以上的高速调制性能。以上实验表明,THz QWP 在高速通信领域潜力无限,如何突破吸收效率和暗电流的限制,研制高性能的 QWP 器件是其高速应用的关键。

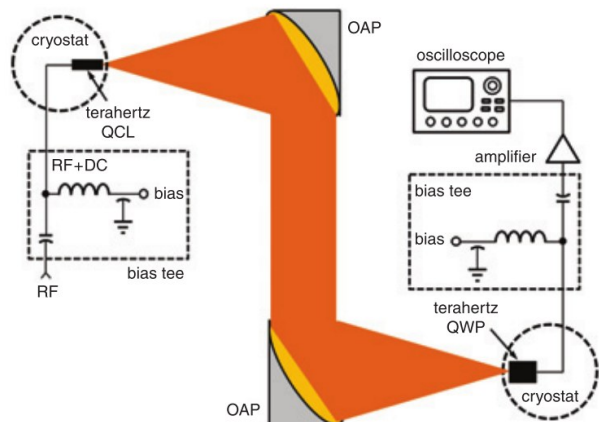


图 8 基于 THz QCL 和 QWP 的无线通信传输系统^[53]

Fig. 8 THz wireless communication transmission system based on THz QCL and THz QWP^[53]

4 结论

综上所述,THz QWP 具有体积小、设计方便、工艺简单、响应速度快等优点,是 THz 大规模焦平面成像和自由空间高速无线通信的重要候选器件。量子阱中较低的子带间吸收效率是制约 THz QWP 应用的重要因素。为了提高吸收效率,可以从理论计算、光耦合方式和工艺制备等方面来优化器件,从而进一步提高器件的光电转换效率和工作温度。另外,THz QWP 是一种窄带探测器,为适应宽谱探

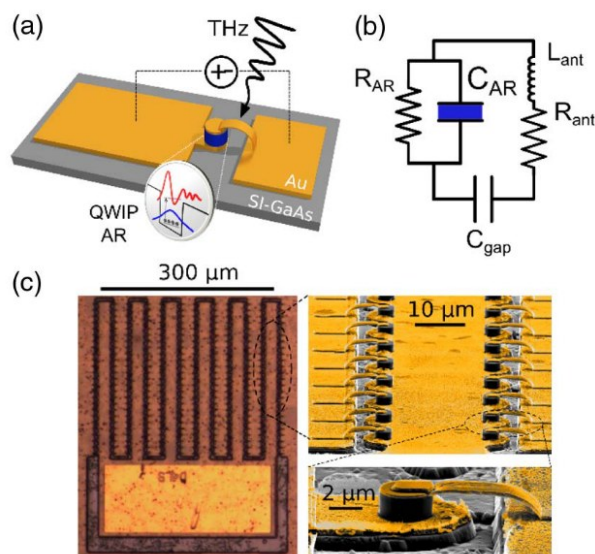


图 9 亚波长 3D 环形天线 THz QWP 阵列探测器,(a) 环形天线 THz QWP 探测单元示意图,(b) 环形天线 THz QWP 阵列探测器显微照片^[53]

Fig. 9 Sub-wavelength THz array detectors based on 3D ring antennas, (a) the schematic of the device unit cell, (b) the equivalent circuit of the device unit cell, (c) the micrographs of the THz array detectors^[53]

测,可将不同探测频率的 QWP 有源区进行堆叠,制备出多色的探测器。利用 THz QWP 进行快速成像可以获得物体的更多细节信息,优化后的快速成像系统有望应用于安全检查和无损检测。此外,THz QWP 具有高速调制性能,基于 THz QWP 的高速无线通信链路为未来 6G 无线通信应用提供了很有前景的技术途径。

References

- [1] Hargreaves S, Lewis R A. Terahertz imaging: materials and methods [J]. *Journal of Materials Science—Materials in Electronics*, 2007, **18**: S299–S303.
- [2] Beard M C, Turner G M, Schmittenmaer C A. Terahertz spectroscopy [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, **106** (29): 7146–7159.
- [3] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20** (7): S266–S280.
- [4] Siegel P H, Dengler R J. Terahertz heterodyne imaging Part I: Introduction and techniques [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **27** (4): 465–480.
- [5] Hubers H W. Terahertz heterodyne receivers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14** (2): 378–391.
- [6] Kohler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J]. *Nature*, 2002, **417** (6885): 156–159.

- [7] Belkin M A, Fan J A, Hormoz S, *et al.* Terahertz quantum cascade lasers with copper metal-metal waveguides operating up to 178 K[J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (5): 3242–3248.
- [8] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. *Nat. Photonics*, 2007, **1** (9): 517–525.
- [9] Li L H, Chen L, Zhu J X, *et al.* Terahertz quantum cascade lasers with > 1 W output powers[J]. *Electron. Lett.*, 2014, **50** (4): 309–310.
- [10] Tani M, Hirota Y, Que C T, *et al.* Novel terahertz photoconductive antennas[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **27** (4): 531–546.
- [11] Shi W, Hou L, Wang X M. High effective terahertz radiation from semi-insulating-GaAs photoconductive antennas with ohmic contact electrodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **110** (2): 023111.
- [12] Ishibashi T, Kodama S, Shimizu N, *et al.* High-speed response of uni-traveling-carrier photodiodes[J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 – Regul. Pap. Brief Commun. Rev. Pap.*, 1997, **36** (10): 6263–6268.
- [13] Kopytko M, Jozwikowski K, Jozwikowska A, *et al.* High frequency response of near-room temperature LWIR HgCdTe heterostructure photodiodes[J]. *Opto-Electronics Review*, 2010, **18** (3): 277–283.
- [14] Palaferri D, Todorov Y, Bigioli A, *et al.* Room-temperature nine- μ m-wavelength photodetectors and GHz-frequency heterodyne receivers [J]. *Nature*, 2018, **556** (7699): 85–88.
- [15] Chang G E, Yu S Q, Liu J F, *et al.* Achievable Performance of Uncooled Homojunction GeSn Mid-Infrared Photodetectors [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2022, **28** (2): 3800611.
- [16] Crowe T W, Porterfield D W, Hesler J L, *et al.* Terahertz sources and detectors in [C]. *Terahertz for Military and Security Applications Iii*, Spie-Int Soc Optical Engineering, Bellingham, 2005, **5790**: 271–280.
- [17] Lewis R A. A review of terahertz detectors [J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2019, **52** (43): 1–23.
- [18] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A Review on Terahertz Communications Research [J]. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 2011, **32** (2): 143–171.
- [19] Chen S G, Shi W, Hou L, *et al.* Investigation of Terahertz Peak Frequencies From GaAs Photoconductive Antennas [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2017, **23** (4): 8400406.
- [20] Ishibashi T, Ito H. Uni-traveling-carrier photodiodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2020, **127** (3): 031101.
- [21] Ren Y A, Miao W, Yao Q J, *et al.* Terahertz Direct Detection Characteristics of a Superconducting NbN Bolometer [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28** (1): 010702.
- [22] Qin H, Sun J D, Liang S X, *et al.* Room-temperature, low-impedance and high-sensitivity terahertz direct detector based on bilayer graphene field-effect transistor [J]. *Carbon*, 2017, **116**: 760–765.
- [23] Liu H C, Luo H, Song C Y, *et al.* Terahertz Quantum Well Photodetectors [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14** (2): 374–377.
- [24] Grant P D, Dudek R, Buchanan M, *et al.* An ultra fast quantum well infrared photodetector [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2005, **47** (1–2): 144–152.
- [25] Durmaz H, Nothern D, Brummer G, *et al.* Terahertz inter-subband photodetectors based on semi-polar GaN/AlGaIn heterostructures [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108** (20): 201102.
- [26] Ghosh S, Mukhopadhyay B, Sen G, *et al.* Performance analysis of GeSn/SiGeSn quantum well infrared photodetector in terahertz wavelength region [J]. *Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures*, 2020, **115**: 113692.
- [27] Cao J C. Terahertz semiconductor detectors [J]. *Physics* (曹俊诚. 太赫兹半导体探测器研究进展, 物理), 2006 (11): 953–956.
- [28] Guo X G, Tan Z Y, Cao J C, *et al.* Many-body effects on terahertz quantum well detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94** (20): 201101.
- [29] Ferre S, Razavipour S G, Ban D Y. Terahertz quantum well photodetectors with improved designs by exploiting many-body effects [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103** (8): 081105.
- [30] Jia J Y, Gao H, Hao M R, *et al.* Dark current mechanism of terahertz quantum-well photodetectors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, **116** (15): 154501.
- [31] Guo X G, Zhang R, Liu H C, *et al.* Photocurrent spectra of heavily doped terahertz quantum well photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97** (2): 021114.
- [32] Zhang G X, Guo X G, Wang H X, *et al.* Bias-Polarity-Dependent Photocurrent Spectra of Terahertz Stepped-Quantum-Well Photodetectors [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2019, **12** (2): 024035.
- [33] West L C, Eglash S J. First Observation of an Extremely Large-Dipole Infrared Transition Within the Conduction-Band of a GaAs Quantum Well [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, **46** (12): 1156–1158.
- [34] Rong Zhang, Research on Metal Grating Coupled Terahertz Quantum Well Photodetectors [D], Doctoral Dissertation, University of Chinese Academy of Sciences, (张戎, 金属光栅耦合太赫兹量子阱探测器研究, 博士论文, 中国科学院大学), 2011.
- [35] Zhang R, Guo X G, Song C Y, *et al.* Metal-Grating-Coupled Terahertz Quantum-Well Photodetectors [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2011, **32** (5): 659–661.
- [36] Wu W, Bonakdar A, Mohseni H. Plasmonic enhanced quantum well infrared photodetector with high detectivity [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96** (16): 161107.
- [37] Sun Y F, Sun J D, Zhou Y, *et al.* Room temperature GaN/AlGaIn self-mixing terahertz detector enhanced by resonant antennas [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **98** (25): 252103.
- [38] Guo X, Zhang R, Cao J, *et al.* Numerical Study on Metal Cavity Couplers for Terahertz Quantum-Well Photodetectors [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, **48** (5): 728–733.
- [39] Palaferri D, Todorov Y, Chen Y N, *et al.* Patch antenna terahertz photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106** (16): 161102.
- [40] Harrer A, Schwarz B, Gansch R, *et al.* Plasmonic lens enhanced mid-infrared quantum cascade detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105** (17): 171112.

- [41] Zhang R, Fu Z L, Gu L L, *et al.* Terahertz quantum well photodetectors with reflection-grating couplers (vol 105, 231123, 2014) [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106** (2): 029902.
- [42] 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.
- [43] Wang H X, Zhang R, Wang F, *et al.* Two-colour THz quantum well photodetectors [J]. *Electron. Lett.*, 2017, **53** (16): 1129–1130.
- [44] 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.
- [45] Shao D X, Zhang R, Fu Z L, *et al.* High responsivity random metal grating couplers for terahertz quantum well photodetectors [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2019, **34** (7): 4.
- [46] Paulillo B, Pirotta S, Nong H, *et al.* Ultrafast terahertz detectors based on three-dimensional meta-atoms [J]. *Optica*, 2017, **4** (12): 1451–1456.
- [47] Zhou T, Zhang R, Guo X G, *et al.* Terahertz Imaging With Quantum-Well Photodetectors [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2012, **24** (13): 1109–1111.
- [48] Zhou T, Tan Z Y, Gu L, *et al.* Three-dimensional imaging with terahertz quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. *Electron. Lett.*, 2015, **51** (1): 85–U1235.
- [49] Qiu F C, Tan Z Y, Fu Z L, *et al.* Reflective scanning imaging based on a fast terahertz photodetector [J]. *Opt. Commun.*, 2018, **427**: 170–174.
- [50] Fu Z L, Gu L L, Guo X G, *et al.* Frequency Up-Conversion Photon-Type Terahertz Imager [J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 8.
- [51] Grant P D, Laframboise S R, Dudek R, *et al.* Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. *Electron. Lett.*, 2009, **45** (18): 952–953.
- [52] Chen Z, Tan Z Y, Han Y J, *et al.* Wireless communication demonstration at 4.1 THz using quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. *Electron. Lett.*, 2011, **47** (17): 1002–U1089.
- [53] Tan Z Y, Li H, Wan W J, *et al.* Direct detection of a fast modulated terahertz light with a spectrally matched quantum-well photodetector [J]. *Electron. Lett.*, 2017, **53** (2): 91–92.
- [54] Li H, Wan W J, Tan Z Y, *et al.* 6.2-GHz modulated terahertz light detection using fast terahertz quantum well photodetectors [J]. *Sci Rep*, 2017, **7**: 3452.