2015年6月

文章编号: 2095-4980(2015)03-0357-05

微型化太赫兹集成器件的前沿技术进展

宋瑞良,宋 跃

(中国电子科技集团公司 第54研究所,河北 石家庄 050081)

摘 要: 针对国际上太赫兹器件技术进展予以概括和分析,提炼出共振隧穿二极管、单向载流子传输光电二极管 2 种可行的小型化器件方案。在材料生长和器件结构方面分析了太赫兹波的 产生原理和难点,在系统应用方面解释了短距离高速通信的实用案例。目前,采用共振隧穿二极 管已实现 2.5 Gbps 速率的 300 GHz 无线通信演示实验,采用单向载流子传输光电二极管在该频点 下实现了 12.5 Gbps 的无线通信实验。

关键词: 太赫兹; 共振隧穿二极管; 单向载流子传输光电二极管; 微纳加工 中图分类号:TN312 **文献标识码:**A **doi**:10.11805/TKYDA201503.0357

Frontier research on micromation and integration of terahertz devices

SONG Ruiliang, SONG Yue

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

Abstract: Based on the analysis of new terahertz devices technology development, resonant tunneling diode and uni-travelling carrier photodiode are concluded as the most feasible solutions in terahertz micro-devices. In terms of material growth and device structure, the principle of terahertz source is analyzed, and the short range communication scheme is also explained. Recently, wireless communication experiment at the data rate of 2.5 Gbps@300 GHz based on resonant tunneling diode has been realized, and the experiment at the data rate of 12.5 Gbps@300 GHz based on uni-travelling carrier photodiode has also been completed.

Key words: terahertz; resonant tunneling diode; uni-travelling carrier photodiode; micro and nano fabrication

太赫兹波(THz)一般是指从 0.3 THz~30 THz 的电磁波^[1],太赫兹频段处于毫米波与红外线之间,相对于微波 和激光技术是一个开发较为滞后的频段,称之为"太赫兹空隙"(THz Gap)。目前的频谱资源中,微波频段受到 管制,带宽资源受限,但太赫兹频率范围未受到限制。由于太赫兹波的频带宽度是微波的 1 000 倍^[2],是很好的 宽带信息载体,适合局域网络布设的宽带无线通信系统使用。此外,由于太赫兹波的非电离特性,对生物细胞无 害,适合在人体医疗检查、毒品样品检测、宇航飞机无损探测等领域发挥重要作用^[3-5]。

目前产生太赫兹波有很多方法,如基于电子学固态器件的倍频及混频方式、基于量子级联激光器方式、基于 电真空器件方式等。这些方法采用的器件原理不同,产生的太赫兹波功率不同,应用场景也不同。但是,大部分 太赫兹波源都需要制作多个腔体及模块再连接成系统,或者在外部配备附属设备以提供高电压或恒定低温的工作 条件。随着半导体器件微纳加工技术的发展,基于半导体材料的微型集成化太赫兹波源已显现出稳步发展的态势。 从应用场景看,手持式、便携式、微型化的太赫兹波源将在安检、短距离通信、无损检测、医疗探查等领域具有 重大市场前景。因此,研究微型化和高集成度的太赫兹源部件已成为国际研究的热点。

1 基于半导体材料的小型化太赫兹波源

基于化合物半导体材料研制的电子学和光子学器件通过合理的材料设计与结构优化即具备独立辐射太赫兹 波的特性。目前,主要的小型化太赫兹器件分类如图1所示。

第13卷

从图 1 可以看出,由于太赫兹波属于电子学和光子学的交界,可采用提高电子学器件的截止频率的方法将器件工作频率推向太赫兹频段或者利用光学器件拍频的方法降至太赫兹频段实现,电子学器件包括碰撞雪崩渡越时间二极管(Impact Avalanche and Transit Time Diode, IMPATT Diode)、耿氏二极管(Gunn Diode)、单向载流子传输光电二极管(Uni-Travelling Carrier Photo Diode, UTC-PD)、共振隧穿二极管(Resonant Tunneling Diode, RTD)以及微波单片集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MICC)等,光子学器件主要有 P-Ge 激光器(P-Ge laser)和量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)等。总体来看,电子学器件的工作频率较低,一般在 1 THz 以下。光子学器件工作频率可以覆盖 1 THz~10 THz,但多数需要在



Fig.1 Category of main terahertz source devices 图 1 主要太赫兹源器件分类^[6]

低温下才能工作,设备不便搬运和携带。在这些器件中,共振隧穿二极管和单向载流子传输光电二极管工作频率 可到1THz以上,同时具有室温应用、体积小、重量轻、无需外部设备等优势,因此可作为小型化和集成化太赫 兹波源的首选器件。

2 共振隧穿二极管

2.1 材料和器件结构

RTD 是基于双势垒单势阱材料结构的两端器件,其中势垒由宽带隙材料构成,宽度为 1.4 nm~5.0 nm,势阱 由窄带隙的材料构成,宽度一般为 3.0 nm~7.0 nm^[7],如图 2(a)所示。当 RTD 两端偏压增加时,RTD 直流特性近 似二极管的电流特性,此时发射区的导带中被占据的能态与阱中最低的分立能级对齐,即形成共振隧穿;当偏压 继续增大到发射区被占据的能带下边缘超过阱中最低能级时,能够通过势垒的隧穿电子数量骤降,表现为直流特 性中的负阻区。当电压继续增高,发射区被占据能带和阱中第二分立能级对准,再次形成隧穿,即第二正阻区, 如图 2(b)所示。



Fig.2 Material structure and I-V characteristic of RTD 图 2 RTD 的材料结构和 I-V 特性

图 3(a)是基于共振隧穿二极管的太赫兹波振荡源(Resonant Tunneling Oscillator, RTO)示意图。RTO 振荡器利用 RTD 的负阻区进行工作:将 RTD 与一个平面缝隙天线进行片上集成,RTD 位于缝隙天线金属薄膜的中心位置, 该缝隙作为一个谐振腔,RTD 在天线中心振荡形成驻波,当 RTD 提供的振荡能量大于缝隙天线损耗的能量时, 可在维持稳定的振荡同时把太赫兹波辐射出去。对于 RTO 而言,其振荡频率取决于外加 LC 并联谐振回路的振荡频率。目前,RTO 的基波辐射频率即可达到 1THz 以上^[9],通过改变缝隙天线结构可以调整其辐射频率。从图 3(b)可以看出,通过调节天线的匹配(offset)参数,可以调整 RTO 在不同频率下的辐射电导,即太赫兹波的辐射频率。由此可见,微型化的 RTO 器件仅需常规芯片电压供电即可独立发射太赫兹波。



Fig.3 Device structure of RTO and radiation conductance curves 图 3 RTO 器件结构原理图和辐射电导曲线图^[8]

2.2 应用方式

基于 RTO 的太赫兹传输系统可在室内短距离的通信场景应用, RTO 一般作为本振源以及射频发射前端使用。 图 4 是基于 RTD 振荡器实现的太赫兹外差式探测系统。

图中,RTD(RF)、RTD(LO)和肖特基势垒二极管 SBD都分别粘接在直径 3 mm 的 Si 半球透镜上。其中, RTD(LO)作为本振源为探测端提供本振信号,RTD(RF) 作为太赫兹波的输出端形成太赫兹射频信号。本方案中 RTD(RF)的频率为 430 GHz,输出功率为 145 µW,RTD (LO)的频率为 435 GHz,输出功率为 148 µW,经过光 混外差探测得到约 6 GHz 中频信号。SBD 的台面面积 为 1 µm×1 µm,截止频率估算为 1.3 THz,探测灵敏度 为 2 800 V/W。



Fig.4 Terahertz heterodyne detection system based on RTO 图 4 基于 RTO 的太赫兹探测系统框图^[10]

在短距离的通信范围内,通过调整 RTD 两端的偏压使其工作在负阻区,采用开关键控(On-Off Keying, OOK) 调制方式将小信号直接加在 RTO 的电极即可实现无线高速传输。此外,通过调整 RTD 的直流偏压和交流小信号 电压,使 RTD 工作在最大功率输出点,从而可进一步提高传输距离。目前采用这种方式在 300 GHz 频点已实现 2.5 Gbps 速率的无线通信演示系统^[11]。

3 单向载流子传输光电二极管

3.1 材料和器件结构

单向载流子传输光电二极管(UTC-PD)的材料结构是由 p 型窄带隙光吸收层和非掺杂或轻掺杂 n 型宽带隙收 集层构成^[12],如图 5 所示。在吸收层产生的光生载流子中,电子是有效载流子,需要渡越到集电区,因此电子 输运的时间决定了器件总的延迟时间^[13]。由于电子的速度比空穴的饱和速度高,所以依靠电子作为主要载流子 的 UTC-PD 器件具有很高的响应速度、较高的 3 dB 带宽和饱和输出电流。



3.2 应用方式

360

在基于 UTC-PD 的太赫兹通信系统中, UTC-PD 将已调制的光信号转换为太赫兹波电信号,通过天线发射出去,其系统框图如图 6 所示。发射端先由 2 个不同波长的激光器实现光混合,产生拍频后与基带信号进行光调制, 经过放大器后利用 UTC-PD 的光电转换功能将调制好的光信号转变为太赫兹频段的电信号,最后经由天线发射出去。接收端与常规太赫兹探测系统类似,采用 SBD 的检波功能探测太赫兹信号并恢复出基带信号,通过频谱仪和误码仪进行信号的分析与测试。日本 NTT 公司于 2004 年首先实现了基于 UTC-PD 的 0.12 THz、10 Gbps 的无线通信系统,并在 2010 年实现了 0.3 THz、无线传输速率为 12.5 Gbps、无线传输距离为 0.5 m 的太赫兹无线通信验证平台。这套系统输出的太赫兹波峰值功率为 110 μW@380 GHz,对应的光电二极管偏置电压为 1.1 V,光电流 10 mA。如果提高其偏置电流至 20 mA,输出功率可以进一步提高至 400 μW。

UTC-PD 作为发射链路的最后一级模块,可将光电转换、天线、Si 半球透镜等部件集成为一个模块,从而提高器件的集成度,降低太赫兹波的损耗。

高器件的集成度,降低太赫茲波的损耗。 发射天线通过制备 UTC-PD 器件电极时完成:将 UTC-PD 的电极设计为天线的形式, 采用片上天线的制作方式在器件芯片上实现。UTC-PD 器件可粘接在 Si 半球透镜上, 直接将收集到的光信号转变为太赫兹信号 通过透镜汇聚发射出去,如图 7 所示。

Fig.7 Modules diagram and picture of integrated UTC-PD 图 7 集成后的 UTC-PD 模块示意图和实物图^[15]

本文根据国内外太赫兹技术的发展现

状,阐述了太赫兹器件微型化和集成化的必要性,针对共振隧穿二极管和单向载流子传输光电二极管两种室温工

作、高集成度、微型化的半导体器件进行了全方面的介绍和分析,为太赫兹器件的小型化发展提供依据。

参考文献

结论

4

- [1] 王琳. 太赫兹空间通信系统的设计与性能分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2008. (WANG Lin. Design & performance analysis of terahertz space communication system[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science & Technology, 2008.)
- [2] 杨光鲲,袁斌,谢东彦. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011,41(4):376-380. (YANG Guangkun,YUAN Bin,XIE Dongyan. Analysis on the use of THz technology in the military application[J]. Laser and Infrared, 2011,41(4): 376-380.)
- [3] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5):481-486. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009,38(5):481-486.)
- [4] 苏兴华,于春香,王瀚卿. 金星表面 THz 遥感探测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):37-40. (SU Xinghua, YU Chunxiang,WANG Hanqing. THz remote sensing for exploration Venus surface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):37-40.)
- [5] 卜凡亮,行鸿彦.太赫兹光谱技术的应用进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2009,23(4);1-6. (BU Fanliang,XING Hongyan. Progress of terahertz spectroscopy[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009,23(4);1-6.)
- [6] Masayoshi Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007,1:97-105.
- [7] 宋瑞良. 共振隧穿器件的研制及模拟研究[D]. 天津:天津大学, 2009. (SONG Ruiliang. Fabrication and simulation research on resonant tunneling devices[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2009.)
- [8] Suzuki S,Hanashimal K,Kishimotol N,et al. Sub-THz resonant tunneling diode oscillators with offset-fed slot antenna[C]// International conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings. Matsue,Japan:[s.n.], 2007: 530-533.
- [9] Teranishi A,Shizuno K,Suzuki S,et al. Fundamental oscillation up to 1.08 THz in resonant tunneling diodes with high indium composition transit layers[C]// 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. Berlin,Germany: [s.n.], 2011:1-4.

