

文章编号: 2095-4980(2018)01-0001-06

InP 基 RTD 太赫兹振荡源及其应用研究进展

石向阳^{a,b}, 苏娟^{a,b}, 谭为^{a,b}, 张健^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200)

摘要: 紧凑和相干的太赫兹源是太赫兹应用的关键组成, 共振隧穿二极管(RTD)是目前振荡频率最高的电子学器件, RTD太赫兹振荡源具有结构紧凑、功耗低、室温工作、有一定输出功率、易集成、覆盖频率较宽等优点。InP基RTD太赫兹振荡源在600 GHz左右的频段内输出功率可达百微瓦量级, 可见报道的最高振荡频率为1.92 THz, 输出功率0.4 μ W。RTD振荡源的输出功率可以通过偏置电压进行直接调制, 使得其在高容量短距离的太赫兹通信系统中具有很大的优势。目前, InP基RTD太赫兹振荡源成为太赫兹源领域的研究热点。

关键词: 共振隧穿二极管; 太赫兹源; 振荡器; 太赫兹通信

中图分类号: TN43

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0001

Research progress of InP-based resonant tunneling diode terahertz oscillator and its various applications

SHI Xiangyang^{a,b}, SU Juan^{a,b}, TAN Wei^{a,b}, ZHANG Jian^{a,b}

(a.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

b.Microsystem & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China)

Abstract: Compact and coherent source is a key component for various applications of terahertz(THz) wave. Resonant Tunneling Diode(RTD) has been considered as candidates for THz oscillators under room temperature, because it is the electronic device with the highest oscillating frequency at present. RTD THz oscillation is of great advantages of compact structure, low power consumption, room temperature work, a certain output power, easy integration, wide coverage and so on. The output power of InP-based RTD THz oscillation could reach hundreds micro-watts at around 600 GHz. Up to now, the oscillation frequency is increased up to 1.92 THz with 0.4 μ W output power. The output power of RTD oscillators can be directly modulated with bias voltage. Because of this property, the RTD oscillator can be adopted as a compact and simple source for high-capacity wireless communications which is an important application of THz waves. InP-based RTD THz oscillator is attracting more and more research interest currently.

Keywords: Resonant Tunneling Diode; terahertz source; oscillator; terahertz communication

太赫兹波(0.1~10 THz)独特的性质使得其在高速通信、成像探测和生物医学诊断等领域具有广泛的应用前景, 紧凑和相干的太赫兹源是其应用的关键组成^[1]。由于太赫兹波在电磁频谱中处于毫米波和红外光之间, 故基于电子学的方法和基于光子学的方法都可以产生太赫兹辐射。共振隧穿二极管(RTD)是目前振荡频率最高的电子学器件^[2], InP基太赫兹RTD振荡源具有结构紧凑、功耗低、室温工作、有一定输出功率、易集成、覆盖频率较宽等优点, InP基太赫兹RTD振荡源在600 GHz左右的频段内输出功率可达百微瓦量级^[3], 可见报道的最高振荡频率为1.92 THz, 输出功率0.4 μ W^[4]。

RTD太赫兹振荡源在THz-WiFi、太赫兹相机、短距离高速通信、太赫兹近距离安检成像等领域中有很大的应用潜力, 成为目前的研究热点。日本、韩国、欧盟等近年来关于InP基RTD太赫兹振荡器的报道较多^[4-6], 2015年由欧盟委员会支持的“地平线2020”中的iBROW(innovative ultra-BROadband ubiquitous Wireless

communications through terahertz transceivers)计划研究利用 InP 基 RTD 振荡源实现新型超宽带太赫兹高速通信^[7]；国内目前开展 InP 基 RTD 振荡器研究的单位主要是中物院微系统与太赫兹研究中心、天津工业大学、中电 13 所、中科院微系统所、中电 55 所等，其主要集中在 RTD 器件理论实验研究和振荡器的理论研究，而关于 RTD 振荡源的实验研究报道较少，故国内亟需深入开展 InP 基 RTD 太赫兹振荡源的实验和应用研究。

1 RTD 振荡器结构及振荡器原理

RTD 是基于量子共振隧穿效应的一种两端负阻器件，其隧穿时间在飞秒量级，是目前实现振荡频率最高的电子学器件，利用 RTD 负微分电阻的特性可实现太赫兹频段的振荡，为具体说明 RTD 振荡器的结构和原理，下面以基于缝隙天线的振荡器为例，对其进行简要分析。

图 1(a)显示了 RTD 振荡器的基本结构，RTD 器件位于缝隙天线的中间，缝隙天线既可作为谐振器形成电磁波的驻波，又相当于天线把产生的振荡信号辐射出去。图 1(b)显示了 RTD 器件的 $I-U$ 特性曲线和共振隧穿发生时的导带图，利用 RTD 的负微分电导区域可以设计振荡器，振荡器简化等效电路图如图 1(c)所示，此处没有考虑 RTD 的接触电阻等寄生参数，振荡条件要满足负微分电导的绝对值大于缝隙天线的辐射损耗电导，即 $G_d > G_L$ 。振荡频率主要由图中的电感 L 和电容 C 决定，其中电感 L 主要源自天线，电容 C 主要源自天线和 RTD。

实际设计的缝隙天线振荡器的结构如图 1(d)所示，RTD 器件的电极连接在天线的左右电极上，在天线的两端电极上下重合，中间隔着 SiO_2 层。利用这种结构，可实现射频回路和直流回路分离，缝隙天线的长度主要决定振荡频率，电阻并联在天线的两端以抑制外部偏置电路引入的低频(2~3 GHz)寄生振荡。RTD 器件材料结构一般为双势垒单势阱材料结构($\text{AlAs}/\text{InGaAs}/\text{AlAs}$)，欧姆接触由 $\text{Au}/\text{Pd}/\text{Ti}$ 电极形成，振荡器中 RTD 的峰值电流密度和台面面积一般分别为百 kA/cm^2 和 μm^2 量级^[8]。

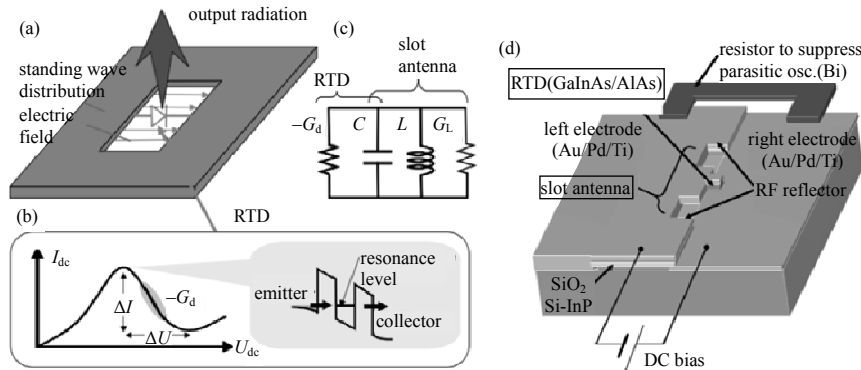


Fig.1 (a) Slot resonator and RTD; (b) Potential profile and current-voltage characteristics of RTD; (c) Equivalent circuit of slot resonator and RTD; (d) RTD oscillator integrated with slot antenna^[8]

图 1 (a) 基于缝隙天线 RTD 振荡器的基本结构; (b) RTD 器件的电学特性和简要能带图; (c) RTD 振荡器的简要等效电路; (d) 基于缝隙天线 RTD 振荡器结构^[8]

从 RTD 的 $I-U$ 特性和材料结构可以理论计算出单个 RTD 振荡器的最高输出功率为^[9]：

$$P_{\max} = \frac{3}{16} \Delta I \Delta U \cos \left[2\pi f \left(\tau_{\text{rtd}} + \frac{\tau_{\text{dep}}}{2} \right) \right] \quad (1)$$

式中： ΔI 和 ΔU 分别为负微分电阻区域的电流宽度和电压宽度； f 为振荡频率； τ_{rtd} 和 τ_{dep} 分别为电子的隧穿时间和电子在集电极耗尽层的渡越时间。如果忽略电子的时间延迟，则理论最高输出功率可表示为 $(3/16)\Delta I \Delta U$ 。

2 InP 基 RTD 太赫兹振荡源研究进展

1988 年，文献报道了 200 GHz 的 AlAs/GaAs RTD 振荡器^[10]，是首个振荡频率进入到太赫兹频段的报道。1991 年，E R Brown 等利用 InAs/AlAs RTD 实现了高达 712 GHz 的基波振荡^[11]，是当时公开报道最高的振荡频率；当时振荡器的输出功率只有几微瓦，且振荡频率在接下来的十多年没有进一步提高，很多学者因此认为 RTD 在太赫兹领域中没有应用前景。然而，2010 年，东京工业大学在 RTD 振荡源的研究上取得重大突破，其通过优化改进 RTD 材料结构和振荡器结构，使得 RTD 振荡源的振荡频率超过了 1 THz^[12]，且振荡频率在几百 GHz 的振荡器输出功率达到百微瓦量级，使得 RTD 在太赫兹领域中表现出很大的潜力。

近年来, InP 基 RTD 太赫兹振荡源得到了较大的发展, 日本东京工业大学、德国达姆施塔特工业大学、英国格拉斯哥大学和韩国科学技术院等单位在这方面取得了很大的进步。其中日本东京工业大学重点研究缝隙天线类型的 RTD 振荡器, 将振荡器安置在硅透镜上以辐射出振荡信号, 该课题组尝试了各种不同结构尺寸的振荡器并优化 RTD 器件的分层结构材料和厚度以实现振荡频率和功率的提高, 目前其报道的最高振荡频率可达 1.92 THz, 输出功率为 0.4 μW , 其报道有代表性的振荡频率 548 GHz^[3] 和 1.31 THz^[13] 对应的输出功率分别为 420 μW 和 10 μW , 为了进一步提高振荡器输出功率, 该课题组利用了相互注入锁模的方法进行相干功率合成, 在 620 GHz, 770 GHz 和 810 GHz 的典型输出功率为 610 μW , 270 μW 和 180 μW ^[3]; 德国达姆施塔特工业大学重点研究的是薄膜型 RTD 振荡器^[14], 即将缝隙天线的谐振器集成到 Vivaldi 天线中以增强振荡信号发射效率, 这种类型的振荡器在 500 GHz 和 1.1 THz 的输出功率约为 1 μW 和 40 μW , 目前课题组主要是理论和实验上研究 RTD 振荡器在超过隧穿和弛豫时间极限条件下的工作状况; 英国格拉斯哥大学研究的 RTD 振荡器形式为单片微波集成电路(Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC), 可见报道的典型频率为 156 GHz, 对应输出功率为 0.24 mW^[6]; 韩国科学技术院研究的 RTD 振荡器形式为 MMIC 电路, 其最高的振荡频率为 1.52 THz, 对应的输出功率为 1.9 μW ^[5]。

图 2(a)汇总了近年来报道 RTD 振荡器的输出功率和振荡频率的对应关系, 其主体趋势是随着频率的增加, 输出功率减小趋势加快; 图 2(b)列出了振荡器中 RTD 的峰值电流密度 J_p 和峰谷电流比(Peak-to-Valley Current Ratio, PVCRR)的关系, 这 2 个指标可以指导 RTD 材料结构的设计, 可见追求高峰值电流密度的优先级较高, 因为在太赫兹波段的振荡器中, RTD 的台面尺寸一般都是微米和亚微米量级的, 高峰值电流密度对振荡功率的提高是有利的。

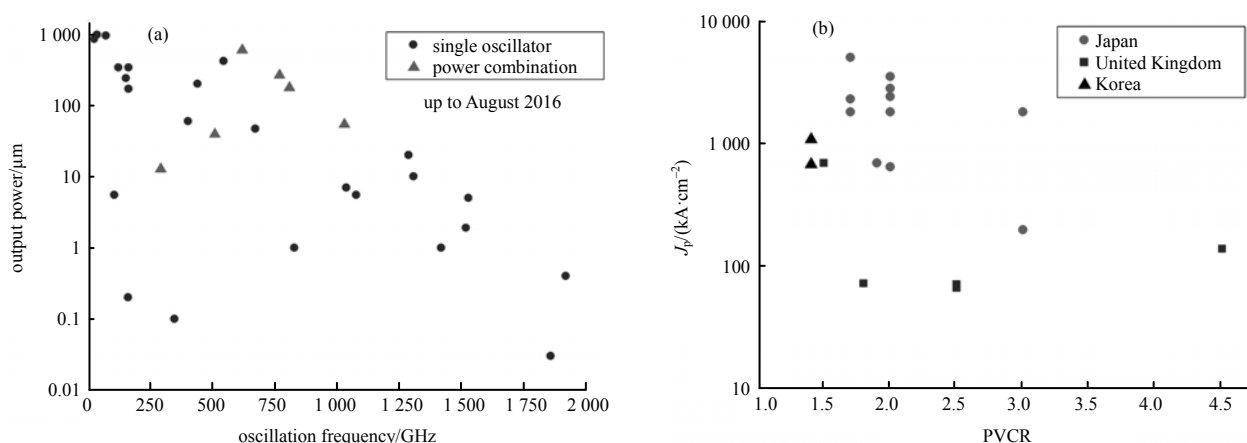


Fig.2 Output power vs. oscillator frequency(a) and peak current density vs. PVCRR(b).

图2 振荡器输出功率随振荡频率的对应关系(a)和振荡器中RTD峰值电流密度与PVCRR的对应关系(b)

关于 RTD 振荡源的研究主要有 4 个方向: 一是通过合理设计材料结构, 优化电子的隧穿和耗尽区渡越时间、结区面积等, 使得振荡频率进一步提高; 二是提高 RTD 器件负微分电阻区域的电压宽度和电流宽度的乘积并优化振荡电路结构, 使得单个振荡器的输出功率提高; 三是设计振荡器的相干功率合成电路, 提高多元振荡器的整体输出功率; 四是在振荡电路中加入变容二极管, 使得振荡器的频率连续可调^[15]。

3 InP 基 RTD 振荡源在太赫兹系统中的应用

RTD 振荡源除上文中叙述的优点之外, 其输出功率可以通过偏置电压进行直接调制^[16], 使得其在高容量短距离的太赫兹通信应用中具有很大的优势; 另外, RTD 的 $I-U$ 特性中在峰值电压处表现出很强的非线性, 使得其可用于太赫兹波检测中, 理论和实验都验证了 RTD 用于检测太赫兹波的灵敏度优于肖特基二极管^[17]。下面概述 RTD 振荡源在太赫兹通信和成像系统中的研究进展。

2012 年, 日本大阪大学 Tadao Nagatsuma 报道了基于 InP 基 RTD 发射和检测的 300 GHz 无线通信系统^[18], 利用图 3(a)中的偏置电压 A 点产生太赫兹振荡信号, 利用 B 点的非线性来检测太赫兹信号, RTD 发射器实物如图 3(b)所示, 通过改变偏置电压可以控制振荡信号的输出, 以实现幅度调制, 如图 3(c)所示, 发射极发射出 300 GHz 的幅移键控(Amplitude Shift Keying, ASK)调制信号, 通过调节接收端 RTD 的偏置电压, 可实现最高 2.5 Gbps 数据传输。

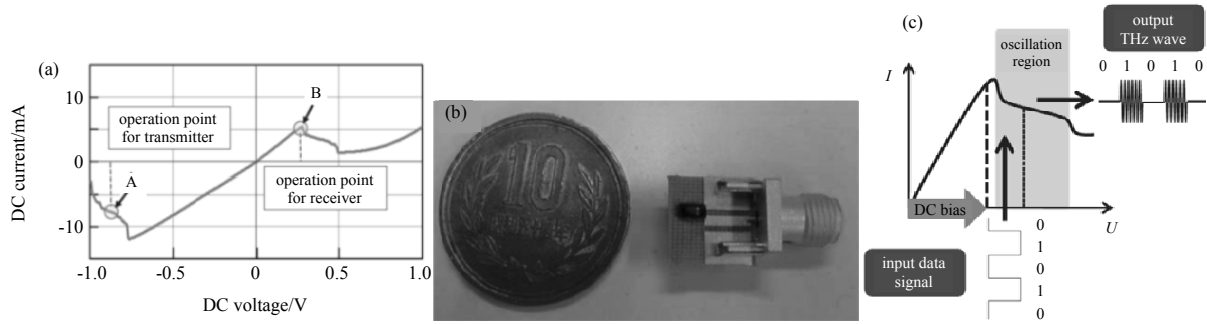


Fig.3 (a) DC I - U characteristics of the RTD; (b) Photograph of the RTD transceiver module; (c) Operation of the RTD with OOK modulation scheme^[18]
图 3 (a) RTD 的 I - U 测试曲线; (b) RTD 发射器实物图; (c) RTD 产生调制的振荡信号方案^[18]

2016 年,日本东京工业大学 Naoto Oshima 等报道了基于 InP 基 RTD 振荡源发射的 490 GHz 无线通信系统^[19],系统方案(如图 4(a)所示)和之前该单位报道的类似,通过调制 RTD 振荡源的偏置电压可实现输出信号的 ASK 调制,调制后的信号经超球面硅透镜辐射出去,接收端通过肖特基二极管检测接收到的信号,误码率随传输码率变化的测试结果如图 4(b)所示,误码率随着传输码率的增加而变大,其中当传输码率高达 30 Gbps 时,误码率为 1.3×10^{-3} ,低于前向纠错(Forward Error Correction, FEC)极限;提高信号的输出功率可以改善传输信号的信噪比,使得误码率降低,进而传输码率可进一步提高。

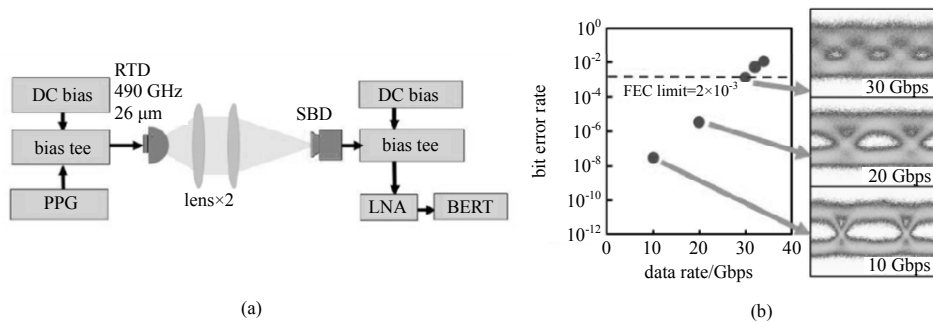


Fig.4 (a) Experiment setup for THz wireless communication using RTD oscillator; (b) Measured eye-patterns^[19]
图 4 (a) 490 GHz 无线通信系统; (b) 误码率随传输码率变化的测试结果和对应的眼图^[19]

2016 年,日本先锋株式会社 Tomoyuki Miyamoto 等报道了基于 InP 基 RTD 的 300 GHz 太赫兹成像^[20],成像系统中利用 RTD 产生并检测太赫兹波信号。搭建的 RTD 反射成像系统,系统方案如图 5(a)所示,通过对分辨率测试图进行成像来测试该系统的分辨力为 1 mm;对黑塑料盒子里的金属物品做成像实验,如图 5(d)所示,成像效果良好。为了得到深度维(即距离维)信息,搭建了基于迈克尔逊干涉仪的干涉反射成像系统,方案如图 6(a)所示;成像样品如图 6(b)和图 6(c)所示,5 个台阶的相对高度分别为 18 μm , 8 μm , 3 μm , 1 μm , 0 μm ;图 6(d)和图 6(e)分别为干涉反射成像系统和普通反射成像系统的成像结果,可以看出干涉反射成像系统的成像结果能较好分辨出各个台阶,而普通反射成像系统很难分辨出台阶,通过进一步分析探测到的信号,得到在高度方向的分辨力为 3 μm 。

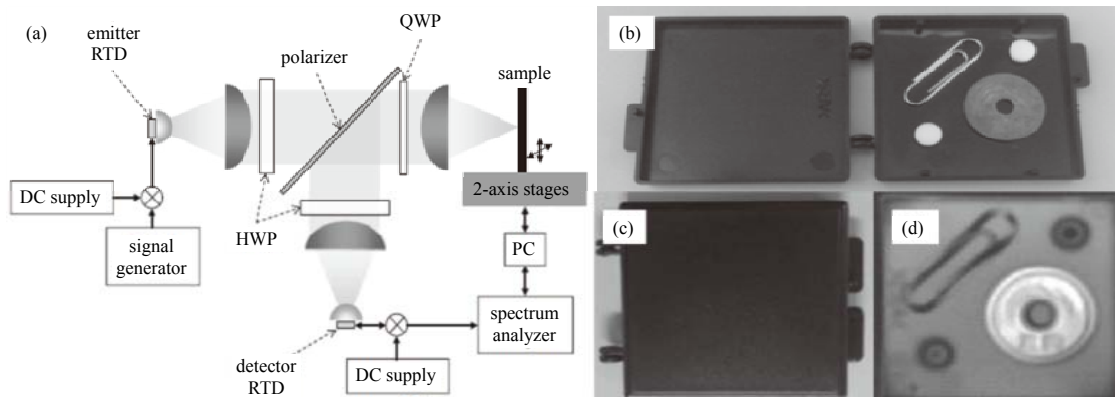
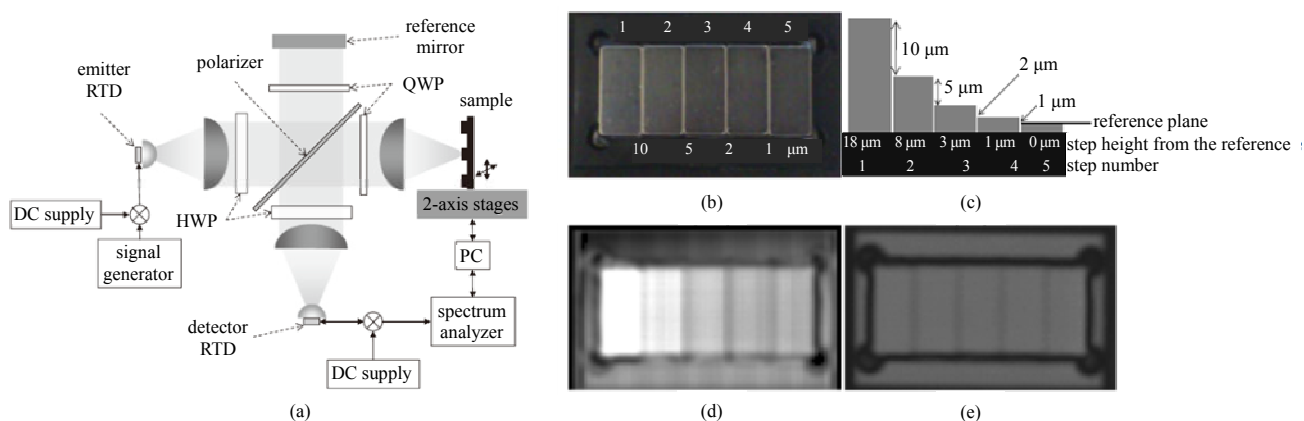


Fig.5 Reflection imaging system setup and imaging experimental results^[20]
图 5 太赫兹反射成像系统方案及成像结果^[20]

Fig.6 Interferometric reflection imaging system setup and imaging experimental results^[20]图 6 太赫兹干涉反射成像系统及成像结果^[20]

4 结论

基于 RTD 的太赫兹振荡源具有结构紧凑、功耗低、室温工作、有一定输出功率、易集成、覆盖频率较宽等优点,其在 600 GHz 左右的频段内输出功率可达百微瓦量级,目前报道的 RTD 振荡器的最高振荡频率为 1.92 THz,输出功率 0.4 μW , 进一步提高 RTD 振荡源的输出功率和振荡频率是以后的发展方向;利用直接调制 RTD 振荡器的太赫兹通信系统实现了 30 Gbps 的数据传输,RTD 振荡器用于 300 GHz 太赫兹成像实验中实现了 1 mm 的分辨力,RTD 振荡源可简化太赫兹系统的结构,使得其在太赫兹领域中的应用前景广阔。

参考文献:

- [1] HANGYO M. Development and future prospects of terahertz technology[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(12):120101.
- [2] FEIGINOV M,KANAYA H,SUZUKI S,et al. 1.46 THz RTD oscillators with strong back injection from collector[C]// 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves(IRMMW-THz). [S.l.]:IEEE, 2014:1-2.
- [3] SUZUKI S,SHIRAIISHI M,SHIBAYAMA H,et al. High-power operation of terahertz oscillators with resonant tunneling diodes using impedance-matched antennas and array configuration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013,19(1):8500108.
- [4] MAEKAWA T,KANAYA H,SUZUKI S,et al. Oscillation up to 1.92 THz in resonant tunneling diode by reduced conduction loss[J]. Applied Physics Express, 2016,9(2):024101.
- [5] LEE J,KIM M,YANG K. A 1.52 THz RTD triple-push oscillator with μW -level output power[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016,6(2):336-340.
- [6] WANG J,ALHARBI K,OFIARE A,et al. High performance resonant tunneling diode oscillators for THz applications[C]// 2015 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium(CSICS). [S.l.]:IEEE, 2015:1-4.
- [7] Innovative ultra-BROadband ubiquitous wireless communications through terahertz transceivers[EB/OL]. [2016-09-18]. <http://ibrow-project.eu/>.
- [8] ASADA M,SUZUKI S,KISHIMOTO N. Resonant tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008,47(6R):4375.
- [9] ASADA M,SUZUKI S. Resonant tunneling diodes for terahertz sources[R]. Handbook of Terahertz Technologies: Devices and Applications, 2015:151.
- [10] BROWN E R,GOODHUE W D,SOLLNER T. Fundamental oscillations up to 200 GHz in resonant tunneling diodes and new estimates of their maximum oscillation frequency from stationary-state tunneling theory[J]. Journal of Applied Physics, 1988,64(3):1519-1529.
- [11] BROWN E R,SÖDERSTRÖM J R,PARKER C D,et al. Oscillations up to 712 GHz in InAs/AlSb resonant-tunneling diodes[J]. Applied Physics Letters, 1991,58(20):2291-2293.
- [12] SUZUKI S,ASADA M,TERANISHI A,et al. Fundamental oscillation of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature[J]. Applied Physics Letters, 2010,97(24):242102.
- [13] KANAYA H,SHIBAYAMA H,SOGABE R,et al. Fundamental oscillation up to 1.31 THz in resonant tunneling diodes with

- thin well and barriers[J]. Applied Physics Express, 2012,5(12):124101.
- [14] FEIGINOV M, SYDLO C, COJOCARI O, et al. Resonant-tunneling-diode oscillators operating at frequencies above 1.1 THz[J]. Applied Physics Letters, 2011,99(23):233506.
- [15] KITAGAWA S, SUZUKI S, ASADA M. Wide frequency-tunable resonant tunneling diode terahertz oscillators using varactor diodes[J]. Electronics Letters, 2016,52(6):479-481.
- [16] IKEDA Y, KITAGAWA S, OKADA K, et al. Direct intensity modulation of resonant tunneling diode terahertz oscillator up to ~30 GHz[J]. IEICE Electronics Express, 2015,12(3):20141161-20141161.
- [17] SHIODE T, MUKAI T, KAWAMURA M, et al. Giga-bit wireless communication at 300 GHz using resonant tunneling diode detector[C]// Asia-Pacific Microwave Conference(APMC 2011). [S.l.]:IEEE, 2012:1122-1125.
- [18] NAGATSUMA T. Terahertz communications technologies based on photonic and electronic approaches[C]// 18th European Wireless Conference. Poznan, Poland:[s.n.], 2012:1-4.
- [19] OSHIMA N, HASHIMOTO K, HORIKAWA D, et al. Wireless data transmission of 30 Gbps at a 500 GHz range using resonant-tunneling-diode terahertz oscillator[C]// 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium(IMS). [S.l.]:IEEE, 2016:1-4.
- [20] MIYAMOTO T, YAMAGUCHI A, MUKAI T. Terahertz imaging system with resonant tunneling diodes[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016,55(3):032201.

作者简介:



石向阳(1990-), 男, 河南省许昌市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹半导体器件与电路, email:shixiangyang@mtrc.ac.cn.

苏娟(1984-), 女, 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为新型太赫兹产生与调控方法.

谭为(1985-), 男, 长沙市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹微纳器件.

张健(1968-), 男, 四川省大竹县人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电子学系统、无线通信、太赫兹技术等.

智能无人系统大会

2018.5.21~22, 北京

会议主席: 樊邦奎 院士, 吕跃广 院士, 陈志杰 院士, 龚惠兴 院士, 刘永坚 院士

主办单位: 中国光学工程学会, 中国无人机产业创新联盟(筹)

承办单位: 中国无人机产业创新联盟(筹)

联办单位: 远望智库

支持媒体: 无人争锋, 海鹰资讯

重点研讨议题: 反无人机技术与城市安防、军民融合发展的未来——智能化无人化战争、智能无人系统领域军民通用技术标准、无人机关键技术、无人系统行业标准与法律法规、传感器技术与无人机、精准农业与植保、陆面无人驾驶、电力巡检与光伏运维

征文方向(包含不限于): 协同化技术、自主化技术、通信技术、导航与路径规划技术、能量推进技术、传感器技术、释放回收技术、模块化、任务载荷技术、反无人机技术、智能化技术

联合征稿: 《无人系统技术》、《太赫兹科学与电子信息学报》科技核心、《飞航导弹》中文核心、《战术导弹技术》中文核心、《现代防御技术》中文核心、《光电与控制》中文核心、《信息与控制》中文核心、《红外与激光工程》EI、《光学精密工程》EI、spie 会议论文集(EI 全文收录)

火热征文中, 截稿时间: 3月31日(第一轮)

投稿请登录在线投稿系统 <http://events.kjtxw.com/tougao/US2018.html>,

- 中英文兼收, 论文经组委会初审后, 择优推荐到合作期刊。论文格式无严格要求, 收到组委会发的录用通知后, 请按推荐期刊格式要求修改论文并将论文全文提交至推荐期刊网站, 由期刊编辑部审核录用后正式发表。
- 若文章希望发表在 SPIE 文集(EI 全文收录), 截止日期前提交英文摘要即可。收到录用通知后提交英文全文至 spie 官网, 会后半年左右全文可在 EI 数据库检索到。
- 若不发表文章, 只希望做粘贴/口头交流, 可在投稿系统上传报告摘要, 题目后注明交流类型(粘贴/口头交流)

组委会联系方式: 吴迪, wudi@csoe.org.cn, 022-58168520