

文章编号: 2095-4980(2024)11-1228-10

太赫兹噪声源研究进展

刘丽娟^a, 秦菲菲^{a,b,c}, 孙粤辉^{a,b,c}, 刘文杰^{a,b,c}, 王云才^{*a,b,c}(广东工业大学 a. 信息工程学院先进光子技术研究院; b. 通感融合光子技术教育部重点实验室;
c. 广东省信息光子技术重点实验室, 广东 广州 510006)

摘 要: 噪声源是一种产生可控(频率及功率可控)噪声的装置, 是器件研发环节中的重要工具。太赫兹噪声源在太赫兹器件噪声系数测试、星载微波辐射计标定、成像和波谱分析等方面具有重要的应用。本文系统地梳理了国内外太赫兹噪声源的发展及研究近况, 分析了基于热力学、电子学和光子学太赫兹噪声源的技术特点, 并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 太赫兹; 噪声源; 超噪比; 平坦度

中图分类号: TN205

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023216

Recent advances in terahertz noise source

LIU Lijuan^a, QIN Feifei^{a,b,c}, SUN Yuehui^{a,b,c}, LIU Wenjie^{a,b,c}, WANG Yuncal^{*a,b,c}

(a. Institute of Advanced Photonics Technology, School of Information Engineering; b. Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education of China; c. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: A Noise Source(NS) is a device that generates controllable noise(with controllable frequency and power), and it is an important tool in the development process of devices. Terahertz noise sources have important applications in terahertz device noise figure testing, calibration of space-borne microwave radiometers, imaging, and spectral analysis. This article systematically reviews the development and research status of Terahertz(THz) noise sources at home and abroad, analyzes the technical characteristics of terahertz noise sources based on thermodynamics, electronics, and photonics, and looks forward to their future development directions.

Keywords: Terahertz; Noise Source; Excess Noise Ratio(ENR); flatness

噪声源是一种产生噪声的装置, 其产生的噪声功率稳定且具有均匀分布的功率谱密度^[1]。相对于冷空(即宇宙微波背景辐射)等自然噪声源, 人造噪声源具有噪声功率和工作频率范围可控等优点, 在微波辐射计校准^[2]、器件的噪声系数测量^[3]、THz 波谱分析^[4]、雷达与成像^[5-6]等方面都具有广泛的应用。

近年来, 在下一代通信技术、雷达成像技术、物质波谱分析、大气遥感和射电天文学等领域对太赫兹技术需求的推动下, 越来越多器件的工作频率被提升至太赫兹波段: 如, 美国喷气推进实验室已研发出工作频率在 576~589 GHz 的高分辨三维成像雷达^[7]; 在轨的欧空局第二代低轨气象卫星 MetOp-SG-B 上的微波辐射计已有高达 448 GHz 和 664 GHz 的观测频率窗口^[1]; 我国正在研制的太赫兹大气临边探测器设置了 240 GHz 和 640 GHz 的观测窗口^[8]。但作为测量器件噪声系数的必要工具, 噪声源的研究受技术难度、经济效应及技术封锁等因素制约, 在工作频段、超噪比(ENR)等方面远远落后于单频太赫兹器件的研发, 亟需重点研究与突破。

1 冷热噪声源

Johnson 实验发现^[9], 导体中自由电子的无规则热运动会在电阻两端产生均方值不为零的噪声电压; Nyquist 推导出电阻(即匹配负载)所产生热噪声的总功率 P 及其相应功率谱密度 $S(f)$ 为^[10]:

收稿日期: 2023-08-05; 修回日期: 2023-09-18

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项基金资助项目(61927811)

*通信作者: 王云才 email:wangyc@gdut.edu.cn

$$P = \frac{(U_n)^2}{4R} = kTB \quad (1)$$

$$S(f) = kT \quad (2)$$

式中： U_n 为匹配负载两端的均方根电压值； R 为匹配阻抗值； k 为玻尔兹曼常数($k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K)； T 为匹配负载的温度(K)； B 为测量带宽。

由式(1)~(2)可知，匹配负载的噪声功率和噪声功率谱密度都与负载所处的温度成正比，因此可用温度表示噪声功率的大小，故 T 又称为等效噪声温度。图1给出了标准室温($T=290$ K)下匹配负载产生的热噪声的计算结果。可以看出，室温下热噪声功率谱密度在0~500 GHz频段内是平坦的，且具有随机起伏的时域波形。

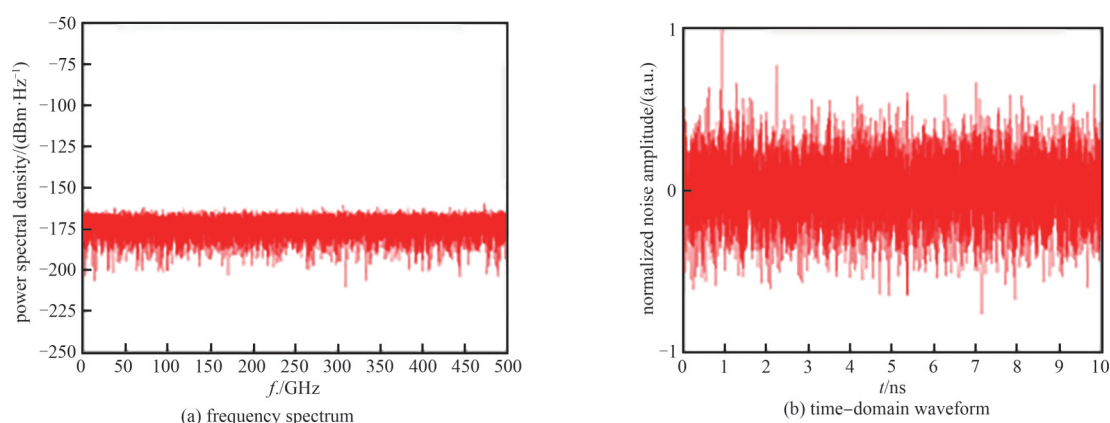


Fig.1 Frequency spectrum and time-domain waveform of the thermal noise at standard room temperature($T=290$ K)

图1 标准室温($T=290$ K)下热噪声的功率谱密度和时域波形

英国皇家雷达研究所 V A Hughes 于 1956 年利用蜡浴加热电阻，研制了等效噪声温度为 433.15~503.15 K 的 S 波段热噪声源^[11]。英国皇家雷达研究所的 Q V Davis 于 1963 年利用水冷陶瓷电阻，研制了可在 75~300 GHz 频率范围内输出等效噪声温度为 1 524.15 K 的热噪声源^[12]。1994 年，美国国家标准与技术研究院 W C Daywitt 等研制了频率为 18~325 GHz、等效噪声温度为 80 K 的 NBS 系列噪声源^[13]。英国 Thomas Keating 公司研制了一款辐射型热噪声源，可在 84~950 GHz 频率范围内输出 364.15 K 的噪声^[14]。国内在冷热噪声的研究几乎与国外同步，1963 年，清华大学唐鹏千通过加热金属丝研制了频率为 1~4 GHz、超噪比为 8 dB 的简易型热噪声源^[15]。2013 年，北京无线电计量测试研究所李芳等利用液氮相平衡制冷技术，研制出频率为 75~110 GHz、等效噪声温度为 80 K 的冷噪声源^[16]，该噪声源中的氮气收集系统可避免水汽在杜瓦瓶内部遇冷凝结，保证了噪声源性能的稳定性。2022 年，电子科技大学羊恺团队研制了频率为 195~205 GHz、等效噪声温度低至 20 K 的冷噪声源^[17]。

基于热力学的噪声源常作为噪声基准对其他类型噪声源进行校准和标定^[18-19]。目前，许多国家都建有毫米波或太赫兹波段的冷热噪声源：如，美国国家标准与技术研究院研发出频率为 18~500 GHz、等效噪声温度低于 80 K 的 NBS 系列噪声基准(见图 2(a))^[20]；韩国标准科学研究院(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)研发了超噪比为 14~18 dB 的 W 波段(75~105 GHz)噪声基准^[21]；中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)建有我国的微波噪声基准(见图 2(b))^[22]，目前最高频率可到 110 GHz，等效噪声温度为 78~30 000 K。但这类噪声源的低温点多工作在液氮环境，体积庞大，超噪比低，无法用于星载微波辐射计的在轨标定等^[23]。

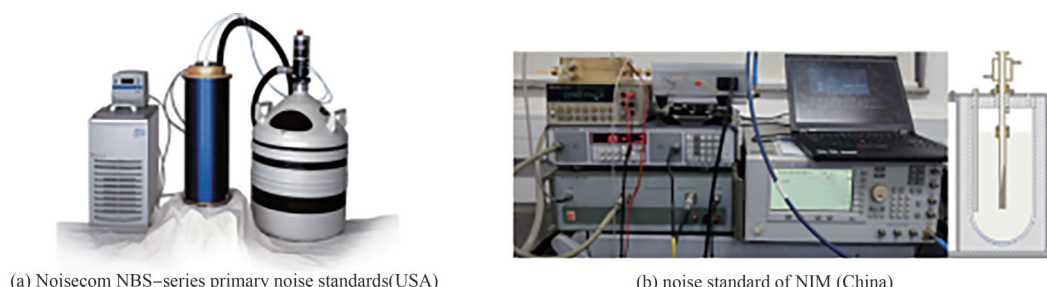


Fig.2 Noise standards of Noisecom and NIM

图2 美国Noisecom公司和中国计量科学研究院的噪声基准

1981 年，澳大利亚悉尼大学 R H Frater 和美国加州大学 D R Williams 发现，场效应晶体管(Field Effect

Transistor, FET)的输入阻抗可等效为一个电容和一个阻值极小的电阻^[24],如图3所示。从热噪声的角度看,极小的阻值相当于只有一部分电阻产生了噪声,其等效噪声温度将低于所处的环境温度。1997年,美国南佛罗里达大学 L P Dunleavy 等研制出变温有源冷噪声源^[25]。2000年,美国马萨诸塞大学 P M Buhles 等利用单片微波集成电路工艺,研制出基于砷化镓-渐变组分高电子迁移率晶体管(Gallium Arsenide-Metamorphic High Electron Mobility Transistor, GaAs mHEMT)的集成噪声源^[26]。2014年,德国弗劳恩霍夫应用固体物理研究所与卡尔斯鲁厄理工学院合作,基于 GaAs mHEMT 研制了频率为 75~110 GHz、等效噪声温度为 230~860 K 的双掷开关集成噪声源,如图 4 所示^[27]。相对于国外的高速发展,国内在有源冷噪声源方面的研究尚显不足。1994年,华中理工大学李青侠等研制了可在 3 GHz 输出 180 K 噪声的冷噪声源^[28]。2018年,中国科学院王振占团队研制了可在 6.8 GHz 输出 137.8 K 噪声的冷噪声源^[29]。2020年,北京无线电计量测试研究所范昌模等研制了频率为 2~4 GHz 的冷噪声源^[30]。

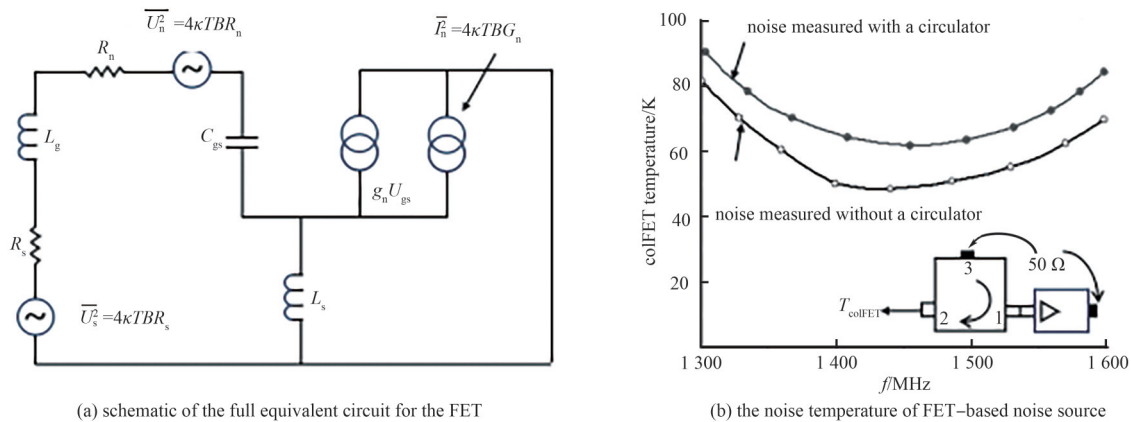


Fig.3 FET-based noise source
图3 基于场效应管的噪声源

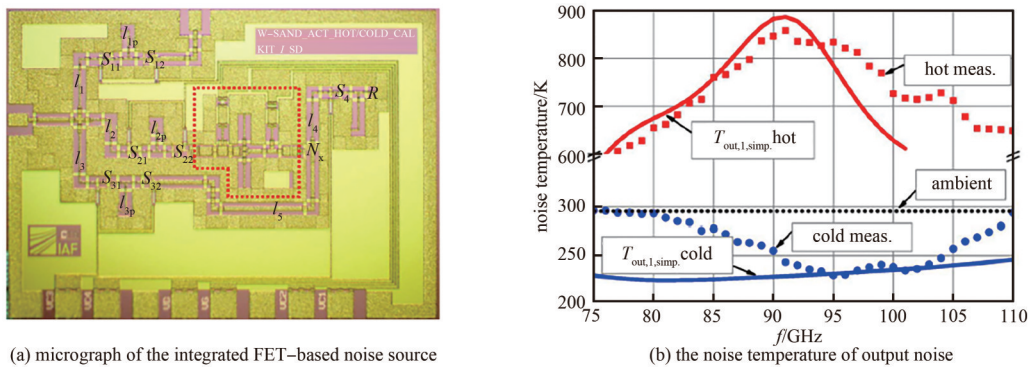


Fig.4 Integrated GaAs mHEMT-based noise source
图4 基于GaAs mHEMT的集成噪声源

有源冷噪声源本质上是一种电子噪声的产生技术,也是目前唯一的可在常温环境下产生低温噪声的技术,在星载辐射计在轨标定方面有着重要的应用前景。

表1列举了目前太赫兹冷热噪声源的主要研究成果(*表示噪声源已产品化)。基于热力学的冷热噪声源的最高工作频率可至 950 GHz,多作为标定其他类型噪声源的噪声基准。有源冷噪声源体积小,但受电子器件带宽限制,很难在较大的频率范围内产生功率谱平坦的太赫兹噪声。

表1 国内外太赫兹冷热噪声源的主要研究成果

Tabell Main research results of THz cold/hot noise sources at home and abroad

reference	frequency/GHz	equivalent noise temperature/K(R_{EN} /dB)
[16] 2013 China	75~110	80
[17] 2022 China	195~205	20 (low)/260 (high)
[20] NBS-500* USA(Noisecom)	330~500	74.42
[12] 1963 UK	75~300	1524.15(R_{EN} 6.29 dB)
[14] hot calibration load* UK(Thomas Keating)	84~950	364.15(R_{EN} -5.92 dB)
[21] noise standard Korea(KRISS)	75~105	7 574.5~18 587.8(R_{EN} 14~18 dB)
[22] noise standard China(NIM)	0.5~110	78 (low)/30 000 (high) (R_{EN} <20.1 dB)
[27] 2014 Germany(active cold noise source)	75~110	230 (low)/860 (high) (R_{EN} 2.93 dB)

2 基于电子学的噪声源

散粒噪声(亦称散弹噪声)是由有源器件中载流子的随机涨落产生的近似白噪声。在电子管或半导体固态设备等有源器件中,载流子穿过运动势垒时会发生电流脉冲效应,从而产生散粒噪声。该散粒噪声可由电流均方值 I_n^2 和电流谱密度 $S_i(f)$ 来表征,其表达式为:

$$I_n^2 = 2qIB \quad (3)$$

$$S_i(f) = 2qI \quad (4)$$

式中: q 为元电荷($q=1.6 \times 10^{-19}$ C); I 为通过有源器件的直流电流值; B 为噪声带宽。可知,散粒噪声的电流均方值是一个定值,且其频谱分布具有白色特性。

肖特基(Schottky)二极管在反向偏压下发生雪崩击穿,从而产生散粒噪声^[31]。1990年,中国科学院曹逸庭基于肖特基二极管研制了工作于 86~96 GHz、超噪比为 10.5 dB 的噪声源^[32];1996年,英国雷丁大学 J W Bowen 基于 GaAs 肖特基二极管研制出工作于 15~200 GHz 的噪声源^[33]。2015年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德航天飞行中心 N Ehsan 等利用 GaAs 肖特基二极管产生频率为 160~210 GHz 的噪声^[34]。法国国家科学研究中心(Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS)的研究者们重点研究了基于硅基肖特基二极管的噪声源^[35-37]。2019年, CNRS 利用 55 nm SiGe 双极性互补金属氧化物半导体(Bipolar Complementary Metal-Oxide Semiconductor, BiCMOS)工艺平台制备了硅基肖特基二极管,产生了频率为 130~260 GHz 噪声^[35];2020年,他们将噪声源的工作频段提高至 130~325 GHz,但超噪比($R_{EN} \leq 20$ dB)随着频率的增加而快速下降(见图 5(a))^[36];2021年,他们通过集成 4 个低噪放大器(Amplifier)对噪声进行放大,将噪声超噪比提高至 37 dB,但受器件带宽的限制,改善超噪比就需牺牲输出噪声的频率范围(下降至 140~170 GHz)^[37],见图 5(b)。

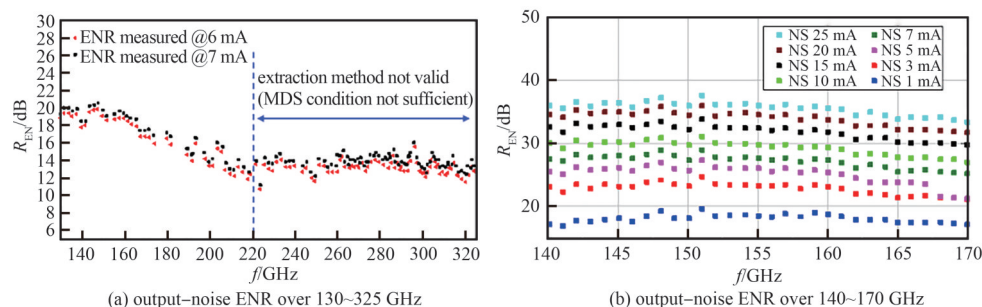


Fig.5 Schottky diode-based noise source of CNRS

图5 基于肖特基二极管的噪声源(CNRS)

碰撞雪崩和渡越时间(Impact Ionization Avalanche Transit Time, IMPATT)二极管是利用雪崩倍增和漂移渡越这2个过程所造成的延迟作用实现微波振荡的二极管。俄罗斯 ELVA-1 公司的 ISSN 系列 26.5~330 GHz^[38]噪声源和美国 Cernex 公司所研制的 CNS 系列 26.5~140 GHz 噪声源^[39]均是基于 IMPATT 二极管的噪声产生器件。2021年,电子科技大学羊恺团队基于 IMPATT 二极管研制出频率为 88~96 GHz、超噪比为 11.8~14.3 dB 的噪声源^[40];2022年,中国电子科技集团第四十一研究所的赵日康等研制出频率为 50~110 GHz、超噪比为 7~23 dB 的噪声源^[41]。

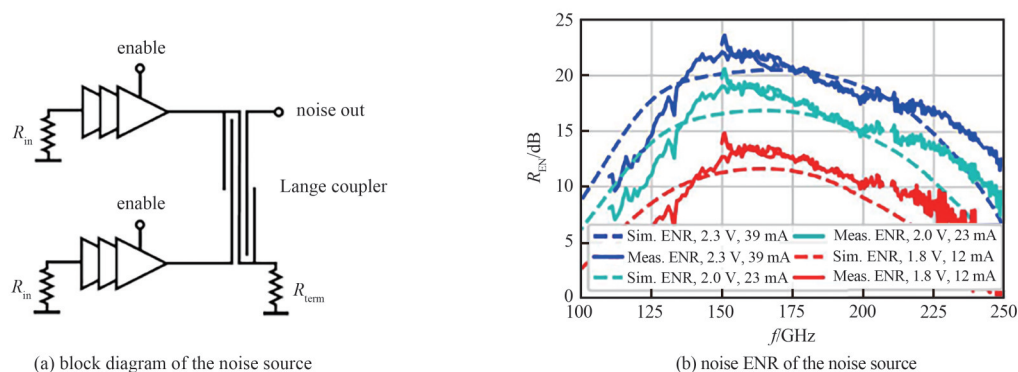


Fig.6 Integrated noise source based on amplifier and Lange coupler

图6 基于放大器和兰格耦合器的集成噪声源

放大器也可用于研制噪声源。2014 年, 美国加州理工学院 C R Parashare 等利用放大器成功研制出太赫兹噪声源^[42]。2021 年, 芬兰国家技术研究中心的 H Forstén 等联合德国莱布尼茨创新微电子研究所和欧洲航天局, 利用 SiGe BiCMOS 工艺平台, 用输入接地的三级级联 CMOS 放大器作为噪声源, 产生了 125~235 GHz、ENR 大于 15 dB 的噪声, 如图 6 所示, 但超噪比不平坦^[43]。

表 2 列举了目前基于电子学太赫兹噪声源的代表性研究成果(*表示噪声源已产品化)。这类噪声源体积小, 价格低, 寿命长, 可集成, 是太赫兹噪声产生的代表性技术, 但受电子器件带宽瓶颈的限制, 这类噪声源的超噪比平坦度通常较差。在电子噪声源研究上, 我国与发达国家还存在较大差距。

表 2 国内外基于电子学的太赫兹噪声源的主要研究成果
Table 2 Main research results of electronics-based THz noise sources at home and abroad

reference, year/model, country(company)	core devices	frequency/GHz	ENR/dB
[33] 1996 UK	Schottky diode	15~200	19.8 @40 GHz
[34] 2015 USA	Schottky diode	160~210	9.6 @200 GHz
[36] 2020 France	Schottky diode	130~325	12~20
[37] 2021 France	Schottky diode+amplifier	140~170	33~37
[38] ISSN-03* Russia (ELVA-1)	IMPATT diode	220~330	36~56
[40] 2021 China	IMPATT diode	88~96	11.8~14.3
[41] 2022 China	-	50~110	7~23
[43] 2021 Finland	amplifier	125~235	10~22

3 基于光子学的噪声源

低频的电噪声通过混频或上变频技术可转换为高频电噪声。2019 年, 英国卢瑟福阿普尔顿实验室(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)的 C Viegas 等^[44]利用传统的电域变频技术, 在 75~110 GHz 和 160~220 GHz 频段内分别产生了超噪比为 12~43 dB 和 8~39 dB 的噪声, 但噪声的功率谱极不平坦。

光子学噪声产生技术实际上相当于光域的下变频技术, 是将光噪声中频率高达数百 THz 的多个非相干光, 输入高速光电探测器进行混频(此时用于光混频的光电探测器又称为光混频器), 转换为毫米波或太赫兹波段的电噪声的过程。具有 n 个非相干光的光噪声光谱 $S(\nu)$ 可表示为:

$$S(\nu) = \sum_{i=1}^n b_i g(\nu - \nu_i) \quad (5)$$

式中: n 取正整数; b_i 为各非相干光幅度; $g(\nu - \nu_i)$ 为各非相干光的归一化光谱。在混频过程中, 光噪声 $S(\nu)$ 在光电探测器进行共轭相乘, 使非相干光混频产生毫米波或太赫兹波段的电噪声。产生的电噪声电流谱密度 $S_i(f)$ 和功率谱密度 $S_a(f)$ 可表示为^[45]:

$$S_a(f) = 2kR_0 S_i(f) = 2kR_0 \Re \{ |h(f)|^2 \} \{ S(\nu) S(\nu)^* \} \quad (6)$$

式中: $k=1/4$ 为最大功率传输系数; $*$ 为共轭符号; R_0 、 $\Re$ 和 $|h(f)|^2$ 分别为光电探测器的匹配阻抗、光电转化效率和归一化频率响应。伴随着以 PIN(Positive Intrinsic Negative)光电二极管和单行载流子光电二极管(Uni-Traveling-Carrier Photodiode, UTC-PD)为代表的高速光电探测器的发展^[46~47], 光子学太赫兹噪声产生技术应运而生。

2004 年, 英国 RAL 的 P G Huggard 等利用掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Application Amplifier, EDFA)的放大自发辐射(Amplification of Spontaneous Emission, ASE)噪声, 经高速光电探测器产生了频率为 50~400 GHz 的宽频带噪声^[48]。2005 年, 日本电报电话(Nippon Telegraph & Telephone, NTT)公司的 H Ito 等用 2 个非相干光源, 经 UTC-PD 混频产生了 0.1~1.5 THz 频段内的噪声, 但噪声功率谱密度随频率增大急剧下降^[49]。2008 年, 日本 NTT 公司 H J Song 等利用 ASE 滤波后的两光拍频, 经 UTC-PD 产生了频率为 293~357 GHz、超噪比大于 33 dB 的噪声, 如图 7 所示^[45]。2014 年, CNRS 的 S Oeuvrard 等将 ASE 光噪声直接经高速光电探测器转换, 产生了超噪比为 (30±5) dB 的 75~110 GHz 噪声^[50]。2020 年, CNRS 的 H Ghanem 等利用 ASE 光和 UTC-PD, 产生了频率为 260~320 GHz、超噪比为 (28.5±2.5) dB 的噪声^[51]。

2010 年, 台湾国立中央大学 J W Shi 等用波长调谐分布式反馈(Distributed Feedback, DFB)激光器和 ASE, 实现了频率范围为 75~110 GHz, 扫描速度为 35 GHz/ms 的扫频噪声源^[52]。2017 年, 中科院上海微系统所曹俊诚团队研制出频率为 90~140 GHz 的噪声, 并结合计算层析, 实现了待测物体的三维成像^[53]。近年来, 广东工业大学在光子噪声源方面也进行了一系列研究^[54~58]: 2021 年, 提出了多束非相干光混频产生太赫兹噪声的方法, 并利用 3 束高斯型非相干光混频, 在 130~170 GHz 内产生了超噪比为 (37.5±2.5) dB 的噪声, 如图 8(a)和 8(c)所示^[54~55];

2022 年, 基于游标效应, 用 2 束梳状噪声光混频产生了频率为 280~380 GHz、超噪比为 17~26 dB 的太赫兹噪声, 如图 8(b)和 8(d)所示^[56,58]。

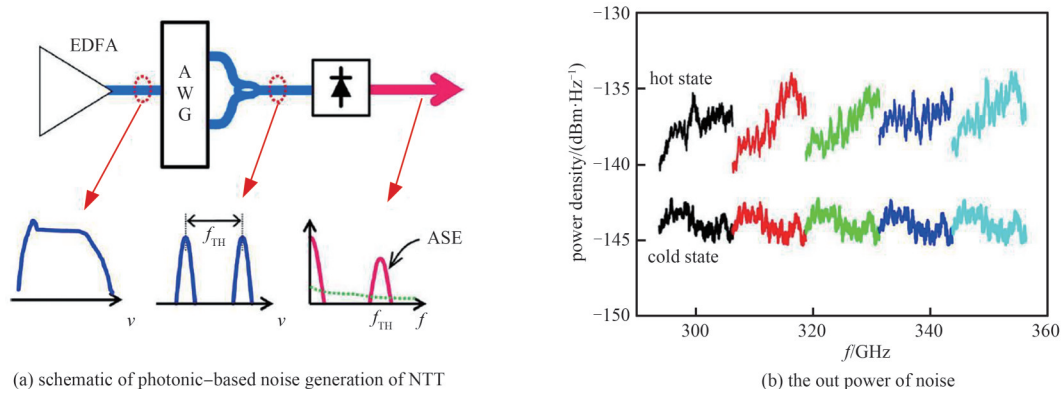


Fig.7 Photonic-based noise generation of NTT
图 7 基于光子学的噪声产生(NTT)

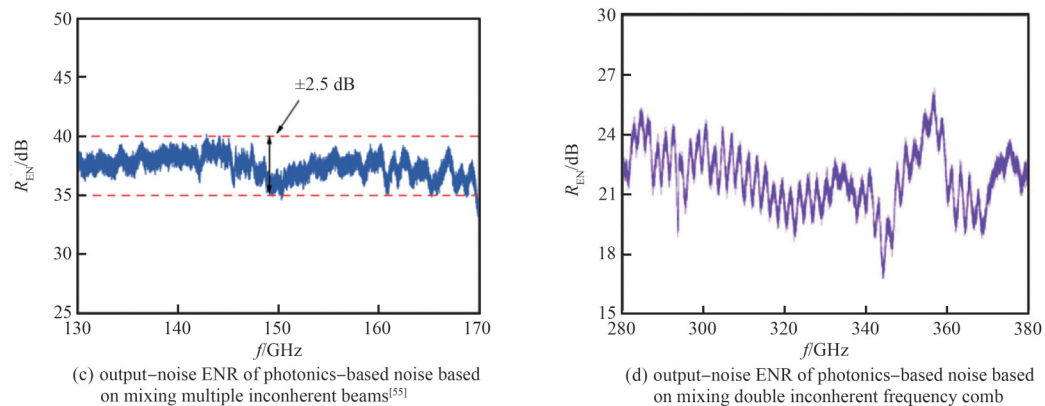
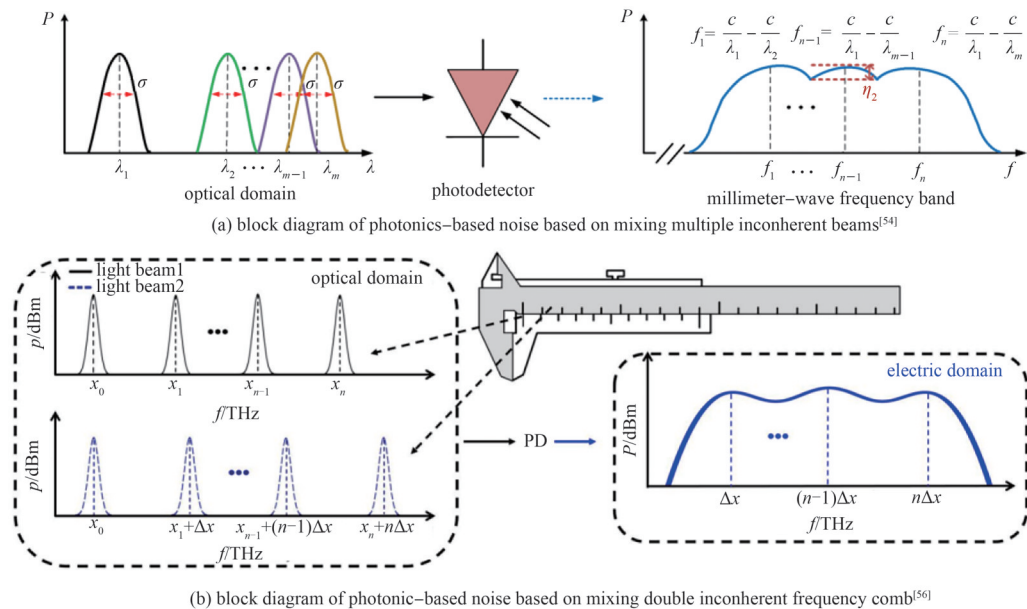


Fig.8 Photonics-based noise generation based on mixing multiple incoherent beams and mixing double incoherent frequency comb
图 8 基于多束非相干光混频和双非相干光梳混频的噪声产生

表 3 列举了基于光子技术产生太赫兹噪声的一些代表性成果。可见, 基于光子技术产生太赫兹噪声的工作频率已超过 380 GHz, 且超噪比高, 超噪比曲线平坦。可以说, 光子产生技术是近年来太赫兹噪声产生研究方向上探索出来的最佳技术路线。

表3 国内外基于光子学的太赫兹噪声源的主要研究成果
Table3 Main research results of photonics-based THz noise sources at home and abroad

reference	core devices	frequency/GHz	ENR/dB
[45] 2008 Japan	UTC-PD	293~357	>33
[50] 2014 France	Ge-on-Si PD	75~110	30±5
[51] 2020 France	UTC-PD	260~320	28.5±2.5
[55] 2022 China	UTC-PD	130~170	37.5±2.5
[58] 2022 China	UTC-PD	280~380	17~26

4 结论

本文系统地梳理了太赫兹噪声源的发展进程和研究现状，从工作频段、噪声超噪比和平坦度 3 个角度重点分析了基于热力学、电子学和光子学太赫兹噪声源的噪声性能。图 9 为一些国际组织报道的基于热力学(黑色图标)^[12,21-22,27]、电子学(蓝色图标)^[20,34,36,38-41,43-44,59-62]和光子学(红色图标)^[45,51-52,55,58]太赫兹噪声源技术的输出噪声平坦度和超噪比。图中,*表示噪声源已产品化,NR 指具体参数未见报道。相对于电子噪声源和光子噪声源,冷热噪声源难以获得较大超噪比的噪声。电子噪声源与光子噪声源的工作频段和超噪比相当,但后者具有较好的噪声平坦度。

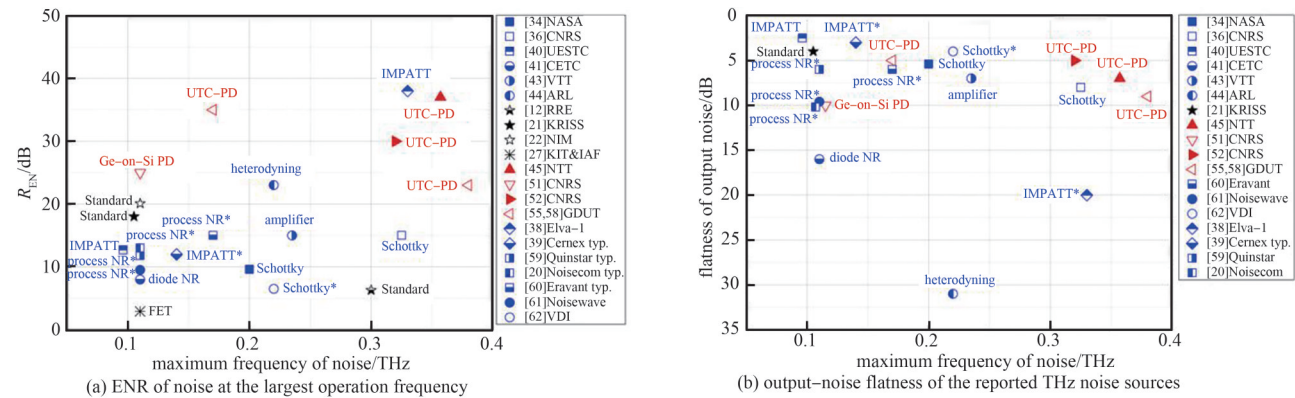


Fig.9 Noise ENR and flatness of the reported THz noise sources
图9 已报道太赫兹噪声源的最大工作频率处的噪声超噪比和平坦度

总之,冷热噪声源输出的噪声温度准确度非常高,常作为噪声基准对其他噪声源进行校准和标定,但该类噪声源体积庞大,输出噪声超噪比较低。相比于冷热噪声源,电子噪声源体积小,寿命长,易集成,已实现量产化并已广泛应用到各个领域,但受电子器件带宽瓶颈的限制,该类噪声源的工作频率难以进一步提升(最高为 325 GHz),且其噪声平坦度较差。光子噪声源可以规避上述 2 种噪声源的缺点,所产生的噪声工作频率高,超噪比大,平坦度好,是近年来太赫兹噪声产生研究的最佳技术路线。

未来的太赫兹噪声产生主要有集成、智能和高速光混频器等几个重要研究方向。在集成方面,要面向星载微波辐射计的在轨校准,研究轻载荷、小体积、可集成于微波辐射计内部的集成噪声源;在智能方面,要面向太赫兹器件的噪声系数测量,研究用于噪声系数分析仪的智能型噪声源;在高速光混频器方面,一是要不断提升 UTC-PD 的带宽和响应度,二是研发带宽超过 500 GHz 的新型光混频器,如金属-半导体-金属高速探测器、行波光电探测器等,以满足对工作频率超过 1 THz 的器件噪声系数测量的需要。

参考文献:

[1] CUADRADO-CALLE D,PIIRONEN P,AYLLON N. Solid-state diode technology for millimeter and submillimeter-wave remote sensing applications:current status and future trends[J]. IEEE Microwave Magazine, 2022,23(6): 44-56. doi: 10.1109/MMM.2022.3155031.

[2] 王振占,董帅,殷晓斌,等. 有源微波冷噪声源的原理及其应用分析[J]. 遥感技术与应用, 2017,32(2):247-254. (WANG Zhenzhan,DONG Shuai,YIN Xiaobin,et al. Analysis of active microwave cold noise source:principles, and applications[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017,32(2):247-254.) doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.2.0247.

[3] LEONG K M K H,MEI X B,YOSHIDA W,et al. A 0.85 THz low noise amplifier using InP HEMT transistors[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015,25(6):397-399. doi:10.1109/LMWC.2015.2421336.

- [4] MOLTER D, KOLANO M, VON FREYMAN G. Terahertz cross-correlation spectroscopy driven by incoherent light from a superluminescent diode[J]. Optics Express, 2019, 27(9):12659–12665. doi:10.1364/OE.27.012659.
- [5] ISPIR M, YILDIRIM A. Real-time signal generator for noise radar[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(9):42–49. doi:10.1109/MAES.2020.2997415.
- [6] 梁践, 周欢, 彭晓昱. 太赫兹二维成像技术研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(5):778–783. (LIANG Jian, ZHOU Huan, PENG Xiaoyu. Research progress of two-dimensional terahertz imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(5):778–783.) doi:10.11805/TKYDA2021131.
- [7] COOPER K B, DENGLER R J, CHATTOPADHYAY G, et al. A high-resolution imaging radar at 580 GHz[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(1):64–66. doi:10.1109/LMWC.2007.912049.
- [8] XU Hao wen, LU Hao, WANG Zhen zhan, et al. The system design and preliminary tests of the THz Atmospheric Limb Sounder (TALIS)[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71):1–12. doi:10.1109/TIM.2021.3135008.
- [9] JOHNSON J B. Thermal agitation of electricity in conductors[J]. Nature, 1927, 119(2984):50–51. doi:10.1038/119050e0.
- [10] NYQUIST H. Thermal agitation of electricity in conductors[J]. Physical Review, 1928(32):110–113.
- [11] HUGHES V A. Absolute calibration of a standard temperature noise source for use with s-band radiometers[J]. Proceedings of the IEE-Part B:Radio and Electronic Engineering, 1956, 103(11):669–672. doi:10.1049/pi-b-1.1956.0230.
- [12] DAVIS Q V. A high temperature termination for use at short millimetre wavelengths[J]. Journal of Scientific Instruments, 1963(40):524. doi:10.1088/0950-7671/40/11/305.
- [13] DAYWITT W C. The noise temperature of an arbitrarily shaped microwave cavity with application to a set of millimetre wave primary standards[J]. Metrologia, 1994(30):471. doi:10.1088/0026-1394/30/5/002.
- [14] TERAHERTZ. Welcome to terahertz home of QMC Instruments Ltd & Thomas Keating Ltd[EB/OL]. [2023-08-05]. <http://www.electroform.co.uk/>.
- [15] 唐鹏千. 热丝式微波标准噪声源[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1963(4):17–32. (TANG Pengqian. A hot filament type microwave standard noise sources[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1963(4):17–32.) doi:10.16511/j.cnki.qhdxxb.1963.04.002.
- [16] 李芳, 陈晋龙. 3 mm 低温标准噪声源研究[C]// 2013 年全国微波毫米波会议. 重庆:电子工业出版社, 2013:732–735. (LI Fang, CHEN Jinlong. Research on 3 mm cryogenic noise standard[C]// 2013 National Microwave and Millimeter Wave Conference. Chongqing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2013:732–735.)
- [17] 周刚. 太赫兹频段噪声源研制[D]. 成都:电子科技大学, 2022. (ZHOU Gang. The development of terahertz band noise source[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.) doi:10.27005/d.cnki.gdzku.2022.001639.
- [18] WELLS J S, DAYWITT W C, MILLER C K S. Measurement of effective temperatures of microwave noise sources[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1964, IM-13(1):17–28. doi:10.1109/TIM.1964.4313364.
- [19] MILLER C K S, DAYWITT W C, ARTHUR M G. Noise standards, measurements, and receiver noise definitions[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(6):865–877. doi:10.1109/PROC.1967.5700.
- [20] NOISECOM. UBS-series and Nc5110a from Noisecom corporation[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://noisecom.com/>.
- [21] KANG T W, KIM J H, KANG N W, et al. A thermal noise measurement system for noise temperature standards in W-band[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6):1741–1747. doi:10.1109/TIM.2015.2398957.
- [22] 中国计量科学研究院. 微波噪声基准[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://www.nim.ac.cn/node/975>. (National Institute of Metrology, China. Microwave noise reference[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://www.nim.ac.cn/node/975>.)
- [23] 董帅, 王振占, 贺秋瑞. 有源微波冷噪声源技术研究进展[J]. 电子设计工程, 2017, 25(3):167–170, 175. (DONG Shuai, WANG Zhen zhan, HE Qiurui. Research progress on active cold noise source[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(3):167–170, 175.) doi:10.14022/j.cnki.dzsjgc.2017.03.041.
- [24] FRATER R H, WILLIAMS D R. An active "cold" noise source[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1981, 29(4):344–347. doi:10.1109/TMTT.1981.1130355.
- [25] DUNLEAVY L P, SMITH M C, LARDIZABAL S M, et al. Design and characterization of FET based cold/hot noise sources[C]// 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Denver, CO, USA: IEEE, 1997:1293–1296. doi:10.1109/MWSYM.1997.596564.
- [26] BUHLES P M, LARDIZABAL S M. Design and characterization of MMIC active cold loads[C]// 2000 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits(RFIC) Symposium Digest of Papers(Cat. No. 00CH37096.) Boston, MA, USA: IEEE, 2000: 221–225. doi:10.1109/RFIC.2000.854453.

- [27] DIEBOLD S, WEISSBRODT E, MASSLER H, et al. A W-band monolithic integrated active hot and cold noise source[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(3): 623–630. doi:10.1109/TMTT.2014.2299770.
- [28] 李青侠, 张祖荫, 林士杰, 等. 室温下的微波有源“冷”噪声源[J]. 微波学报, 1994(3): 28–32. (LI Qingxia, ZHANG Zuyin, LIN Shijie, et al. Microwave active cold noise source at room temperature[J]. Journal of Microwaves, 1994(3): 28–32.)
- [29] 董帅, 王振占, 李彬, 等. C波段有源微波冷噪声源设计及其性能分析[J]. 电子学报, 2018, 46(11): 2797–2802. (DONG Shuai, WANG Zhenzhan, LI Bin, et al. Design and characterization of C-band active cold noise source[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(11): 2797–2802.) doi:10.3969/j.issn.0372-2112.2018.11.030.
- [30] 范昌模, 程春悦. L波段有源冷噪声源研究[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(5): 38–42. (FAN Changmo, CHENG Chunyue. Research on active cold noise source at L band[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(5): 38–42.) doi:10.12060/j.issn.1000-7202.2020.05.06.
- [31] HAITZ R H, VOLTMER F W. Noise of a self-sustaining avalanche discharge in silicon: studies at microwave frequencies[J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(7): 3379–3384. doi:10.1063/1.1656784.
- [32] 曹逸庭. 3 mm 肖特基势垒二极管雪崩噪声源[J]. 红外研究, 1990(4): 317–320. (CAO Yiting. Avalanche noise source of Schottky barrier diode in the 3 mm band[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990(4): 317–320.)
- [33] BOWEN J W. A solid-state noise source for millimetre wave spectrometry[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1996, 17(3): 479–491. doi:10.1007/BF02088023.
- [34] EHSAN N, PIEPMEIER J, SOLLY M, et al. A robust waveguide millimeter-wave noise source[C]// 2015 European Microwave Conference(EuMC). Paris, France: IEEE, 2015: 853–856. doi:10.1109/EuMC.2015.7345898.
- [35] AZEVEDO GONCALVES J C, GHANEM H, BOUVOT S, et al. Millimeter-wave noise source development on SiGe BiCMOS 55 nm technology for applications up to 260 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(9): 3732–3742. doi:10.1109/TMTT.2019.2926289.
- [36] GHANEM H, AZEVEDO GONCALVES J C, CHEVALIER P, et al. Modeling and analysis of a broadband Schottky diode noise source up to 325 GHz based on 55 nm SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(6): 2268–2277. doi:10.1109/TMTT.2020.2980513.
- [37] FIORESE V, AZEVEDO GONCALVES J C, BOUVOT S, et al. A 140 GHz to 170 GHz active tunable noise source development in SiGe BiCMOS 55 nm technology[C]// 2021 the 16th European Microwave Integrated Circuits Conference(EuMIC). London, United Kingdom: IEEE, 2022: 125–128. doi:10.23919/EuMIC50153.2022.9783645.
- [38] ELVA-1 COMPANY. ISSN-03 of ELVA-1 corporation[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://elva-1.com/>.
- [39] Cernex. Your ultimate sources for all your: RF, microwave, millimeter-wave components and sub-systems[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://cernex.com/>.
- [40] 孙超. W波段噪声源研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2021. (SUN Chao. The development of W-band noise source[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.) doi:10.27005/d.cnki.gdzku.2021.004635.
- [41] ZHAO Rikang, ZHANG Zhizheng, ZHANG Yu, et al. Design and implementation of 50~110 GHz ultra-broadband noise source[C]// 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Harbin, China: IEEE, 2022: 1–3. doi:10.1109/ICMMT55580.2022.10023241.
- [42] PARASHARE C R, KANGASLAHTI P P, BROWN S T, et al. Noise sources for internal calibration of millimeter-wave radiometers[C]// 2014 the 13th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad). Pasadena, CA, USA: IEEE, 2014: 157–160. doi:10.1109/MicroRad.2014.6878930.
- [43] FORSTÉN H, SAIJETS J H, KANTANEN M, et al. Millimeter-wave amplifier-based noise sources in SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(11): 4689–4696. doi:10.1109/TMTT.2021.3104028.
- [44] VIEGAS C, POWELL J, LIU Hairui, et al. Millimeter-wave noise sources using heterodyne mixing of signals[C]// 2019 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference(IMARC). Mumbai, India: IEEE, 2019: 1–2. doi:10.1109/IMARC45935.2019.9118675.
- [45] SONG H J, SHIMIZU N F, KUKUTSU N, et al. Microwave photonic noise source from microwave to sub-terahertz wave bands and its applications to noise characterization[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(12): 2989–2997. doi:10.1109/TMTT.2008.2007325.
- [46] ALI M, GARCÍA-MUÑOZ L E, NELLEN S, et al. High-speed terahertz PIN photodiode with WR-3 rectangular waveguide output [C]// 2020 the 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Buffalo, NY, USA: IEEE, 2020: 1–2. doi:10.1109/IRMMW-THz46771.2020.9370781.

- [47] CHAO Enfei,XIONG Bing,SUN Changzheng,et al. D-band MUTC photodiodes with flat frequency response[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2022,28(2:Optical Detectors):1–8. doi:10.1109/JSTQE.2021.3115488.
- [48] HUGGARD P G,AZCONA L,ELLISON B N,et al. Application of 1.55 μm photomixers as local oscillators & noise sources at millimetre wavelengths[C]// Infrared and Millimeter Waves,Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on 2004 and the 12th International Conference on Terahertz Electronics,2004. Karlsruhe,Germany:IEEE, 2004:771–772. doi:10.1109/ICIMW.2004.1422321.
- [49] ITO H,FURUTA T,NAKAJIMA F,et al. Photonic generation of continuous THz wave using uni-traveling-carrier photodiode[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005,23(12):4016–4021. doi:10.1109/JLT.2005.858221.
- [50] OEUVRARD S,LAMPIN J F,DUCOURNAU G,et al. On wafer silicon integrated noise source characterization up to 110 GHz based on Germanium-on-Silicon photodiode[C]// 2014 International Conference on Microelectronic Test Structures(ICMTS). Udine,Italy:IEEE, 2014:150–154. doi:10.1109/ICMTS.2014.6841484.
- [51] GHANEM H,LÉPILLIET S,DANNEVILLE F,et al. 300 GHz intermodulation/noise characterization enabled by a single THz photonics source[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020,30(10):1013–1016. doi:10.1109/LMWC.2020.3020817.
- [52] KUO F M,SHI J W,TSAI H J,et al. Optoelectronic generation of millimeter-wave white-light at W-band with very-fast sweeping rate by use of high-power and broadband photonic emitters[C]// 2010 Conference on Optical Fiber Communication(OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego,CA,USA:IEEE, 2010:1–2. doi:10.1364/NFOEC.2010.JWA51.
- [53] ZHOU Tao,ZHANG Rong,YAO Chen,et al. Terahertz three-dimensional imaging based on computed tomography with photonics-based noise source[J]. Chinese Physics Letters, 2017,34(8):084206. doi:10.1088/0256-307X/34/8/084206.
- [54] SUN Yuehui,CHEN Yongxiang,LI Pu,et al. Flat millimeter-wave noise generation by optically mixing multiple wavelength-sliced ASE lights[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021,33(22):1270–1273. doi:10.1109/LPT.2021.3117022.
- [55] 孙粤辉,郭亚,王云才,等. 130~170 GHz 平坦毫米波噪声信号产生技术[J]. 中国科学(信息科学), 2022,52(11):2155–2162. (SUN Yuehui,GUO Ya,WANG Yuncui,et al. Generation of 130~170 GHz flat millimeter-wave noise signal[J]. Science in China (Information Sciences), 2022,52(11):2155–2162.)
- [56] LIU Wenjie,HUANG Yimin,SUN Yuehui,et al. Broadband and flat millimeter-wave noise source based on the heterodyne of two Fabry-Perot lasers[J]. Optics Letters, 2022,47(3):541–544. doi:10.1364/OL.447656.
- [57] 黄奕敏,刘文杰,郭亚,等. 利用游标效应的两非相干光频梳混频产生全波段毫米波白噪声[J]. 光学学报, 2022,42(13):228–232. (HUANG Yimin,LIU Wenjie,GUO Ya,et al. Generation of full band millimeter-wave white noise using two incoherent optical frequency comb mixing based on Vernier effect[J]. Acta Optica Sinica, 2022,42(13):228–232.) doi:10.3788/AOS202242.1335001.
- [58] 黄奕敏. 基于 Vernier 效应的平坦毫米波噪声光学产生技术[D]. 广州:广东工业大学, 2022. (HUANG Yimin. Optical generation technology of flat millimeter wave noise based on Vernier effect[D]. Guangzhou, China: Guangdong University of Technology, 2022.) doi:10.27029/d.cnki.ggdgu.2022.001613.
- [59] QUINSTAR CORPORATION. QNS-FB12TW from Quinstar corporation[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://quinstar.com/>.
- [60] ERAVANT CORPORATION. Eravant's STZ-06-IT2[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://www.eravant.com/>.
- [61] NOISEWAVE CORPORATION. Noisewave's NW75G110-W[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://noisewave.com/>.
- [62] VDI CORPORATION. WR5.1NS from VDI corporation[EB/OL]. [2023-08-05]. <https://www.vadiodes.com/en/>.

作者简介:

刘丽娟(1995–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹噪声产生技术与应用.email:1112203007@mail.2.gdut.edu.cn.

秦菲菲(1989–), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为太赫兹光电器件及应用.

孙粤辉(1979–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为混沌激光理论与应用、毫米波噪声产生技术与应用.

刘文杰(1988–), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为半导体光电器件、毫米波器件及应用.

王云才(1965–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为混沌激光理论与应用、太赫兹噪声产生技术与应用、太赫兹光混频器研究.