

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407846

# 140~220 GHz 光子太赫兹噪声源\*

宋宇辉<sup>1,2,3</sup> 孙粤辉<sup>1,2,3</sup> 李 璞<sup>1,2,3</sup> 赵泽宇<sup>1,2,3</sup> 刘丽娟<sup>1,2,3</sup> 沈伊人<sup>1,2,3</sup> 刘文杰<sup>1,2,3</sup> 王云才<sup>1,2,3</sup>

(1. 广东工业大学 信息工程学院 先进光子技术研究院 广州 510006; 2. 广东工业大学通感融合光子技术教育部重点实验室 广州 510006; 3. 广东工业大学广东省信息光子技术重点实验室 广州 510006)

**摘 要:**太赫兹噪声源是高频器件噪声系数测试和性能评估的重要工具。传统基于电子学的固态噪声源由于受到电子器件带宽的限制,难以实现高超噪比且功率谱平坦的太赫兹噪声输出,从而限制其在更高频段的应用。为解决这一问题,基于光子学方法研制太赫兹噪声源样机,利用两束非相干光在高速光电探测器上进行光子混频,可以产生频率范围覆盖 140~220 GHz,最高超噪比达 47 dB,平坦度小于 $\pm 2.0$  dB 的太赫兹噪声,可通过改变光功率实现超噪比调谐。此外,对样机的运行稳定性及输出重复性进行了测试,结果表明该样机在 12 h 运行中的超噪比输出稳定度为 0.35 dB,10 次开关机的输出重复度为 0.39 dB。为了进一步验证噪声源样机的性能,测量了混频器模块的噪声系数,测量结果的不确定度小于 0.48 dB。光子太赫兹噪声源的研制提升了我国噪声源的最高工作频率,为太赫兹器件的设计和优化提供了必备的测试仪器。

**关键词:**噪声源;超噪比;光子混频;光电探测器;太赫兹

**中图分类号:** TN98; TN209      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4035

## 140~220 GHz photonic terahertz noise source

Song Yuhui<sup>1,2,3</sup> Sun Yuehui<sup>1,2,3</sup> Li Pu<sup>1,2,3</sup> Zhao Zeyu<sup>1,2,3</sup> Liu Lijuan<sup>1,2,3</sup>  
Shen Yiren<sup>1,2,3</sup> Liu Wenjie<sup>1,2,3</sup> Wang Yuncai<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Advanced Photonics Technology, School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Photonic Technology for Integrated Sensing and Communication, Ministry of Education of China, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Information Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Terahertz noise sources are critical tools for noise figure measurement and performance evaluation of high-frequency devices. Traditional solid-state noise sources based on electronics face challenges in achieving high excess noise ratio (ENR) and flat power spectral characteristics due to the bandwidth limitations of electronic components, restricting their application in higher frequency bands. To address this issue, this study developed a prototype terahertz noise source using photonic methods. By utilizing two beams of incoherent light for photo-mixing in a high-speed photodetector, the system generates terahertz noise with a frequency range of 140~220 GHz, a maximum ENR of 47 dB, and a flatness better than  $\pm 2.0$  dB. The ENR can also be tuned by adjusting the optical power. Stability tests show that the prototype maintains an ENR stability of 0.35 dB over 12 hours of continuous operation and an output repeatability of 0.39 dB over 10 power cycles. Additionally, the noise figure of a mixer module was measured using the noise source, with the measurement uncertainty being less than 0.48 dB. The development of this photonic terahertz noise source has increased the maximum operating frequency of noise sources in China, providing essential testing instruments for the design and optimization of terahertz devices.

**Keywords:** noise source; excess noise ratio; photo-mixing; photodetector; terahertz

收稿日期: 2024-09-22      Received Date: 2024-09-22

\* 基金项目: 国家重点研发(2020YFB1806401)、国家自然科学基金(61927811)、珠江人才引进计划(2019ZT08X340)项目资助

## 0 引言

太赫兹(terahertz, THz)波频段覆盖(0.1~10 THz),因其独特的电磁特性,近年来在多个领域得到广泛关注和应用<sup>[1]</sup>。例如,在G波段(140~220 GHz)可实现高分辨率的无损检测<sup>[2]</sup>、生物医学成像<sup>[3]</sup>、隐蔽物体的安全检测<sup>[4]</sup>、高速无线通信<sup>[5]</sup>、精密测距与雷达应用<sup>[6]</sup>等。为保证太赫兹器件在140~220 GHz频段内具备优良的噪声特性,对其噪声系数(noise figure, NF)进行表征显得尤为重要<sup>[7]</sup>,高性能的太赫兹噪声源的研制对器件的开发和优化具有关键作用。

现有频率高于100 GHz的噪声源包括基于场效应管的有源冷噪声源<sup>[8]</sup>、基于热力学的冷热噪声源<sup>[9-10]</sup>以及基于散弹噪声的电子噪声源<sup>[11-14]</sup>等。例如,美国VDI公司研制出G波段超噪比(excess noise ratio, ENR)为8.5 dB,平坦度为±2.0 dB的噪声源(WR5.1NS),韩国Seo等<sup>[11]</sup>使用该噪声源测量200 GHz收发芯片的噪声系数。三星美国研究中心使用美国Eravant公司研制的噪声源对其相控阵接收机中的低噪声放大器进行表征<sup>[12]</sup>,该噪声源工作频率范围为110~170 GHz,输出超噪比为15 dB,平坦度为±3.0 dB。据报道,国内最高频率的噪声源为中国电科第41所研制,工作频率为110 GHz<sup>[13]</sup>。国际上,俄罗斯ELVA-1公司研制出频率为330 GHz的噪声源(ISSN-03)<sup>[14]</sup>,超噪比为40.5 dB,平坦度为±14.5 dB。电子固态噪声源受限于电子器件带宽,难以产生高超噪比且功率谱平坦的噪声信号。近年来,基于光子学的噪声产生技术有望解决电子噪声源带宽受限的问题。将光噪声经过高速光电探测器进行光子混频,能够在太赫兹频段产生超噪比更高的噪声信号。2020年Ghanem等<sup>[15]</sup>将单束非相干光注入单行载流子光电探测器(uni-travelling-carrier photodiode, UTC-PD)进行混频,在260~320 GHz频率范围产生了超噪比为28 dB、平坦度为±2 dB的噪声信号。2022年本文课题组<sup>[16]</sup>提出多光混频的方法,利用三束非相干光混频,在130~170 GHz频率范围内产生超噪比大于35 dB的噪声信号。目前,光子噪声源均需采用体积庞大的掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)和滤波器,噪声源系统体积大,难以集成,限制了其在特定场景中的应用(例如星载辐射计的标定)。

本文基于光子学方法产生噪声解决电子固态噪声源带宽受限的问题。利用布拉格光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)对宽带非相干光滤波产生两束高斯型光,通过半导体光放大器(semiconductor optical amplifier, SOA)放大后在UTC-PD上混频产生频率范围140~220 GHz,超噪比高达47 dB,平坦度小于±2.0 dB的太赫兹噪声,

并且实现输出噪声超噪比线性可调。相较于已报道的光子学技术,创新的使用了FBG和SOA缩小了系统的体积,实现了噪声源样机的集成。该光子噪声源的研制为我国太赫兹器件的研发与系统性能评估提供关键测试设备。

## 1 光子太赫兹噪声源的研制与结果分析

### 1.1 光子混频产生噪声基本原理

当光功率一定的情况下,两束相同的高斯型非相干光耦合后的光功率谱密度 $S(\nu)$ 可表示为:

$$S(\nu) = \frac{S_0}{2} \left[ \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_1)^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_2)^2}{2\sigma^2}\right) \right] \quad (1)$$

式中: $\nu$ 代表高斯光的中心频率; $S_0$ 代表在中心频率处光功率谱密度的峰值; $\sigma$ 表示高斯噪声分布的标准差。

由于电功率谱与光谱的卷积成正比<sup>[17]</sup>,因此耦合后的非相干光经过UTC-PD混频后得到噪声功率谱 $S(f)$ ,可表示为:

$$S(f) = \frac{KR_0 R^2(f) P^2}{\sqrt{\pi} \sigma} \left\{ \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{[f - (\nu_2 - \nu_1)]^2}{4\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{f^2}{4\sigma^2}\right) \right\} \quad (2)$$

式中: $K$ 代表最大功率传输系数; $R_0$ 表示系统阻抗; $R(f)$ 是光电探测器的响应; $P$ 代表入射光的平均功率; $\exp\left(-\frac{f^2}{4\sigma^2}\right)$ 为两束光拍频后产生的低频噪声,会被高频段光电探测器的带通响应滤除。

作为噪声源的主要性能指标的超噪比是噪声源输出超过常温噪声部分与常温噪声部分的比值,可以表示为:

$$ENR = 10 \lg \frac{T_{on} - T_{off}}{T_0} \quad (3)$$

式中: $T_{on}$ 和 $T_{off}$ 表示噪声源在开启和关闭状态下的噪声温度; $T_0$ 为标准噪声温度( $T_0 = 290$  K)。在标准噪声温度下, $T_{off} = T_0$ ,当 $ENR \geq 15$  dB时,根据式(3)计算得 $T_{on} \approx 9460$  K,远大于标准噪声温度,因此式(3)可近似为:

$$ENR \approx 10 \lg \frac{T_{on}}{T_0} \quad (4)$$

根据奈奎斯特噪声定理:

$$N = KTB \quad (5)$$

式中: $N$ 为噪声功率; $K$ 是玻尔兹曼常数; $T$ 为噪声温度; $B$ 为等效噪声带宽。将式(5)代入式(4)可得:

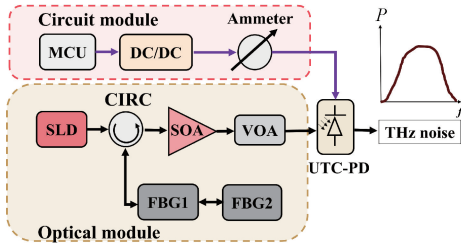
$$ENR \approx 10 \lg \frac{N_{on}}{N_0} = S_{on}(f) - S_{off}(f) \quad (6)$$

式中: $N_{on}$  与  $T_{on}$  对应,表示噪声源开启状态下的噪声功率; $N_0$  与  $T_0$  对应,表示参考功率;对于光子太赫兹噪声源, $S_{on}(f)$  和  $S_{off}(f)$  分别表示有无入射光激发 UTC-PD 的输出功率谱密度。在标准噪声温度下, $S_{off}(f) = -174 \text{ dBm/Hz}$ 。

1.2 光子太赫兹噪声源的结构

噪声源样机装置原理示意图如图 1(a) 所示,包含光路模块、电路模块以及光混频器模块 3 个部分。

光路模块中,使用超辐射发光二极管 (super luminescent diode, SLD) 作为宽带光源,经过串联的两支高斯型 FBG 滤波反射后线宽均为 0.6 nm,对应中心波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为 1 551.74 和 1 553.15 nm 的非相干光。利用环形器 (circulator, CIRC) 将反射的高斯光耦合进 SOA 进行放大。光衰减器 (variable optical attenuator, VOA) 控制注入 UTC-PD 的光功率大小,实现噪声的输出功率可调谐。



(a) 光子太赫兹噪声源原理  
(a) Schematic diagram of terahertz photonic noise source

电路模块中的微控制单元 (micro control unit, MCU) 作为噪声源样机系统主控芯片,承担实时控制与监测功能,通过 LCD 显示屏实现人机交互,实时调节超噪比大小,并通过屏幕显示的光电流数值判断系统是否正常运行。为满足 UTC-PD 负电压偏置需求,系统集成 DC/DC 直流电压转换模块,该模块为 UTC-PD 提供 -1 V 供电,电压输出波动为 10  $\mu\text{V}$  量级。MCU 通过分辨率为 0.1  $\mu\text{A}$  的电流计 (Ammeter) 实时读取 UTC-PD 的光电流变化,以此作为系统运行状态的评估标准。通过对光电流监控,MCU 能够迅速识别任何偏离正常工作范围的异常情况,确保系统在各种条件下的稳定性和可靠性。

光混频器模块使用超宽带 UTC-PD (IMD13001, NTT),带宽为 140~220 GHz。

图 1(b) 是光子太赫兹噪声源实物。噪声源样机外部尺寸为 304.00 mm×159.10 mm×269.88 mm ( $W\times H\times D$ )。



(b) 光子太赫兹噪声源实物  
(b) Picture of photonic terahertz noise source

图 1 光子太赫兹噪声源的设计与实现

Fig. 1 Design and implementation of photon terahertz noise source

1.3 光子太赫兹噪声源实验结果

为验证光子太赫兹噪声源的性能,进行了相关的噪声产生实验。噪声源样机输出最大超噪比结果如图 2(a) 所示,黑点为仿真结果,红线为实验结果,子图为一束非相干光的光谱。结果表明,实验数据与数值仿真具有良好的一致性,样机输出最大超噪比为 47 dB,平坦度为  $\pm 2.0 \text{ dB}$ 。

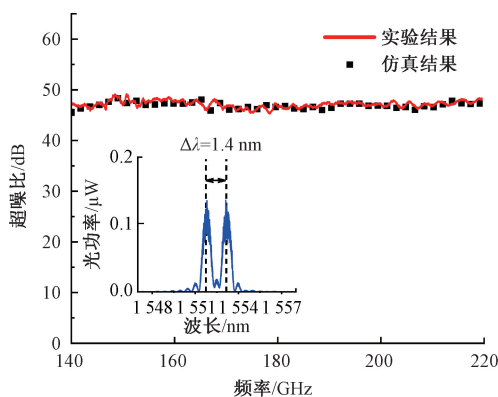
图 2(a) 中,噪声源的超噪比可调是基于光功率的调控所实现,而且入射 UTC-PD 的光功率与噪声源输出的超噪比成线性比例关系,如图 2(b) 所示。当入射光功率达到 10.3 dBm 时,UTC-PD 达到饱和,继续增加光功率至 13.3 dB,超噪比不变。入射光功率分别为 0.13、5.27、10.29 dBm 的超噪比曲线如图 2(c) 所示,样机输出的噪声平坦度基本相同。综合图 2(a)~(c) 的实验结果可知,光子太赫兹噪声源具有良好的超噪比线性调谐功能。

样机与 VDI 公司电学噪声源产品 WR5.1NS<sup>[18]</sup> 的超噪比对比如图 3 所示。可见,研制的噪声源样机的最大

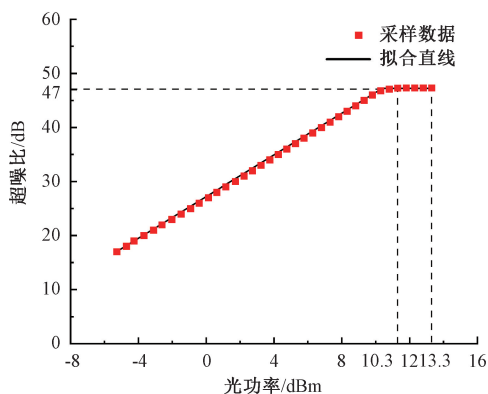
超噪比输出远高于 WR5.1NS。高超噪比的太赫兹噪声源可以满足较高噪声系数的器件测试和较大动态范围的系统校准需求。

1.4 稳定度测试实验结果

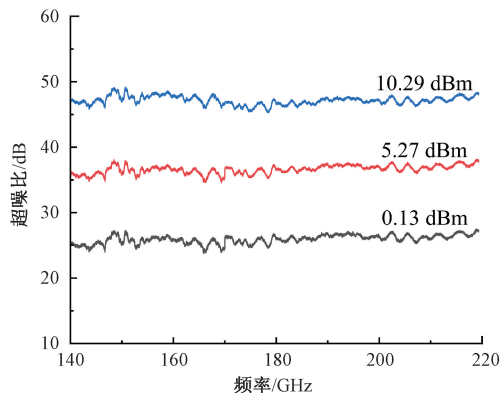
在噪声源样机测试中,采用开关机重复度和时间稳定度两个指标衡量噪声源的工作稳定度。前者反映了噪声源重复开机输出超噪比的偏移量,后者表明噪声源在持续工作期间输出超噪比随时间的变化情况。实验是在常温下进行的,温度为 23  $^{\circ}\text{C}$ ,湿度为 40%。噪声源在输出最高超噪比的工作情况下,进行 10 次重复开机实验,每次开机等待 30 min,使噪声源样机预热,待样机预热完成后进行数组采集,每次采集 10 组数据进行统计分析。测试数据如表 1 所示,在相同频点下,每次开机的超噪比的最大极差仅为 0.39 dB@220 GHz,且噪声源在超噪比输出最大频点下,超噪比极差为 0.17 dB。说明噪声源每次开机均能稳定工作,该结果表明噪声源具有稳定的开机重复度。每隔 0.5 h 采集 10 组数据,分析结果如表 2 所示。噪声源在不同时间输出超噪比的最大极差为



(a) 样机最高超噪比的仿真与实验结果, 子图为实验光谱  
(a) The simulation and experimental results of the prototype's the maximum ENR, the subgraph is the experimental spectrum



(b) 超噪比随输入UTC-PD光功率的变化  
(b) The change of the ENR with the incident optical power of the UTC-PD



(c) 3组不同入射UTC-PD光功率的超噪比  
(c) The ENR for three different incident optical power of the UTC-PD

图2 光子太赫兹噪声源输出

Fig. 2 Output of the photonic terahertz noise source

0.28 dB, 经过 12 h 工作后, 极差为 0.35 dB。实验数据统计分析结果表明噪声源在 12 h 持续工作中具有时间工作稳定的超噪比输出。

### 1.5 结果分析

光子太赫兹噪声源实验结果与稳定度测试结果表明, 噪声源样机在超噪比大小、调谐能力以及工作稳定性

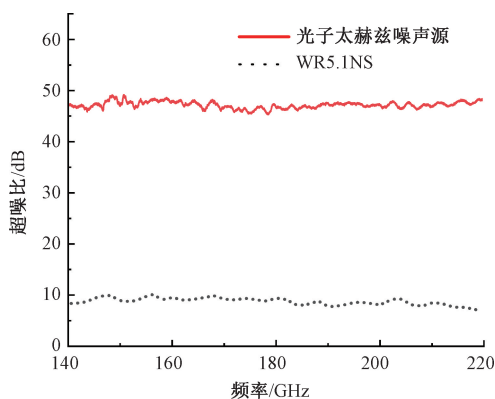


图3 噪声源最高超噪比与 WR5.1NS 输出超噪比  
Fig. 3 The maximum ENR of noise source and ENR of WR5.1NS

等方面均表现出优异特性。样机超噪比最高 47 dB、平坦度  $\pm 2.0$  dB。噪声源样机与国际 VDI 公司产品 WR5.1NS<sup>[18]</sup> 相比, 其最大输出超噪比数值超近 5 倍, 并且突破国内噪声源产品最高频率<sup>[13]</sup>; 与光子技术的噪声源相比, 本文利用两束非相干光在光电探测器上进行光子混频, 输出 ENR 相较于文献[15]的噪声源的 ENR 高 19 dB。此外, 文献[15-16]噪声源系统中含有体积庞大的 EDFA 和光滤波器, 本文使用蝶形封装的 SLD、SOA 和定制的 FBG, 结合空间布局优化进一步缩小了光子噪声源体积; 噪声源样机稳定性测试中, 10 次开关机重复性实验的超噪比极差为 0.39 dB, 12 h 稳定性实验中, 超噪比的最大极差为 0.35 dB, 这是由于噪声源样机内部采用定制金属外壳封装后的 FBG, 使其不受外界温度变化和应力的影响。本文研制的光子太赫兹噪声源为太赫兹器件的研发与测试提供了坚实的技术支撑。

## 2 噪声系数测量

### 2.1 Y 因子法噪声系数测量原理

噪声系数是待测器件输入端信噪比与输出端信噪比相比后的对数值<sup>[19]</sup>, 其表达式为:

$$NF = 10 \lg F = 10 \lg \frac{S_{in}/N_{in}}{S_{out}/N_{out}} = \frac{N_{out}}{G_{DUT} N_{in}} = 10 \lg \frac{G_{DUT} N_{in} + N_{DUT}}{G_{DUT} N_{in}} \quad (7)$$

式中:  $S_{in}$  与  $S_{out}$  分别表示输入与输出待测器件的信号功率;  $N_{in}$  与  $N_{out}$  分别为输入与输出待测器件的噪声功率,  $N_{out}$  由  $G_{DUT} N_{in}$  和  $N_{DUT}$  组成;  $G_{DUT} N_{in}$  表示输入噪声功率在待测器件输出端的贡献;  $N_{DUT}$  表示待测器件内部固有的噪声功率。

将式(5)代入式(7)可得:



表 1 开关机重复度测试  
Table 1 Repeatability test of power on/off

开关机 次数	不同频点超噪比/dB									超噪比最大频率 点及其数值	
	140 GHz	150 GHz	160 GHz	170 GHz	180 GHz	190 GHz	200 GHz	210 GHz	220 GHz		
1	46.75	47.14	48.07	47.61	46.58	47.52	47.19	46.86	47.98	148.5 GHz	49.27 dB
2	46.86	47.41	48.07	47.93	46.68	47.62	47.18	47.02	48.15	148.5 GHz	49.36 dB
3	46.92	47.38	48.08	47.86	46.61	47.60	47.30	46.85	48.05	148.5 GHz	49.35 dB
4	47.01	47.51	48.23	47.80	46.70	47.73	47.21	46.92	48.01	148.5 GHz	49.35 dB
5	46.99	47.39	48.06	47.90	46.70	47.73	47.25	46.74	48.16	148.5 GHz	49.40 dB
6	46.87	47.40	48.17	47.93	46.84	47.67	47.15	46.73	48.10	148.5 GHz	49.37 dB
7	46.88	47.51	48.24	47.79	46.63	47.63	47.27	46.82	47.95	148.5 GHz	49.23 dB
8	46.85	47.29	47.93	47.65	46.60	47.36	47.05	46.73	47.92	148.5 GHz	49.38 dB
9	46.76	47.23	48.05	47.61	46.56	47.57	47.14	46.78	47.85	148.5 GHz	49.25 dB
10	46.78	47.29	47.94	47.56	46.76	47.51	46.98	46.71	47.77	148.5 GHz	49.29 dB
极差/dB	0.26	0.37	0.31	0.37	0.28	0.37	0.32	0.31	0.39	—	0.17

表 2 长时间稳定度测试  
Table 2 Long term stability testing

时间/h	最大值/dB	最小值/dB	平均值/dB	标准差/dB	极差/dB	时间/h	最大值/dB	最小值/dB	平均值/dB	标准差/dB	极差/dB
0.5	47.44	47.37	47.40	0.03	0.07	6.5	47.49	47.31	47.41	0.04	0.18
1	47.43	<b>47.15</b>	47.34	0.09	<b>0.28</b>	7	<b>47.50</b>	47.35	47.42	0.03	0.15
1.5	47.42	47.31	47.37	0.03	0.11	7.5	47.48	47.33	47.41	0.04	0.15
2	47.42	47.29	47.36	0.04	0.13	8	47.46	47.36	47.41	0.03	0.10
2.5	47.48	47.36	47.42	0.04	0.12	8.5	47.47	47.38	47.42	0.03	0.09
3	47.31	47.16	47.21	0.05	0.15	9	47.45	47.37	47.41	0.03	0.08
3.5	47.47	47.22	47.33	0.08	0.25	9.5	47.44	47.39	47.42	0.02	0.05
4	47.46	47.32	47.39	0.04	0.14	10	47.44	47.27	47.39	0.06	0.17
4.5	47.42	47.33	47.37	0.03	0.09	10.5	47.41	47.37	47.39	0.02	0.04
5	47.50	47.33	47.41	0.05	0.17	11	47.48	47.32	47.41	0.06	0.16
5.5	47.48	47.34	47.40	0.04	0.14	11.5	47.42	47.31	47.38	0.05	0.11
6	47.45	47.30	47.38	0.05	0.15	12	47.43	47.34	47.39	0.03	0.09

$$F = 1 + \frac{T_{\text{DUT}}}{T_0} \tag{8}$$

式中： $T_{\text{DUT}}$  为待测器件的噪声温度。

$Y$  因子是指噪声源开关机（“热态”和“冷态”）分别测得输出噪声功率之比为：

$$Y = \frac{N_{\text{on}}}{N_{\text{off}}} = \frac{T_{\text{on}} + T_{\text{DUT}}}{T_{\text{off}} + T_{\text{DUT}}} \tag{9}$$

式中： $T_{\text{on}}$  和  $T_{\text{off}}$  分别为噪声源开启和关闭状态下的噪声温度； $T_{\text{DUT}}$  是待测器件的噪声温度。由式(9)可得  $T_{\text{DUT}}$  的表达式为：

$$T_{\text{DUT}} = \frac{T_{\text{on}} - YT_{\text{off}}}{Y - 1} \tag{10}$$

在标准室温下  $T_0 = T_{\text{off}}$ ，将式(10)代入式(8)可得：

$$NF_{\text{DUT}} = 10\lg\left(\frac{T_{\text{on}} - T_{\text{off}}}{T_0}\right) - 10\lg(Y - 1) \tag{11}$$

将式(3)代入式(11)，可得：

$$NF_{\text{DUT}} = ENR - 10\lg(Y - 1) \tag{12}$$

2.2 噪声系数测量实验装置

使用噪声源样机进行噪声系数测量的系统示意图如

图 4 所示,待测器件为 170~260 GHz 混频器模块。本系统中低噪声放大器(low noise amplifier,LNA)级联频谱分析仪作为接收机,其工作时也会产生噪声,需要先对接收机的噪声系数进行校准。

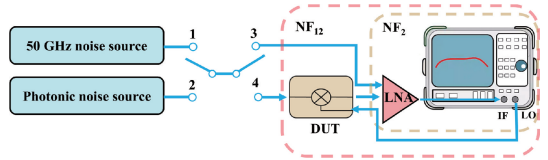


图 4 测量混频器噪声系数实验装置

Fig. 4 Device diagram for measuring the noise coefficient of a mixer

混频器的工作模式为扫描本振(local oscillator,LO)固定中频(intermediate frequency,IF),因此频谱仪的工作频率为混频器的中频频率<sup>[20]</sup>(1.3 GHz),本振信号由频谱仪提供。校准实验中,接通 1 和 3,利用 0~50 GHz 噪声源对接收机中频频点的噪声系数进行测量。LNA 作为接收机的一部分,作用是降低接收机的噪声系数对待测器件噪声系数测量结果的影响<sup>[21]</sup>,根据式(12)计算接收

机的噪声系数  $NF_2$ 。

测量阶段,接通 2 和 4,光子噪声源连接待测器件和接收机。根据式 (12) 和 (13) 测量待测器件的噪声系数  $NF_{DUT}$ 。

$$G = \frac{N_{on,12} - N_{off,12}}{N_{on,2} - N_{off,2}}, F_{DUT} = F_{12} - \frac{F_2 - 1}{G} \tag{13}$$

式中: $G$  为待测器件增益; $N_{on,12}$  与  $N_{on,2}$  分别表示在噪声源开启状态下,有、无待测器件接入接收机时测量的功率; $N_{off,12}$  与  $N_{off,2}$  分别表示在关闭噪声源状态下,有、无待测器件接入接收机时测量的功率; $F_{12}$  是待测器件与接收机级联的噪声因子; $F_2$  是接收机的噪声因子。

2.3 噪声系数测量结果与不确定度分析

1) 噪声系数测量结果

实验将噪声源输出超噪比调节至 25 dB,测量混频器 170~220 GHz 频率范围内的噪声系数,测量 32 组数据取平均值,实验结果如图 5 所示,表明混频器的噪声系数在 10~15 dB 范围内波动。对于混频器而言,其内部核心组件(肖特基二极管)存在非线性效应及寄生效应等问题<sup>[22]</sup>,其工作特性在不同频点处存在固有差异。这一差异性导致混频器噪声系数在不同频点处的波动。

2) 不确定度分析

噪声系数的测量不确定度来源于 3 部分,分别为噪声源、待测器件以及接收机系统。因此,测量不确定度  $U$  为<sup>[23]</sup>:

$$U = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \left( \left( \frac{F_{12}}{F_1} (\delta NF_{12})^2 + (\delta ENR)^2 \right)^2 + \left( \frac{F_2}{F_1 G} (\delta NF_1)^2 + (\delta ENR)^2 \right)^2 + \left( \frac{F_2 - 1}{F_1 G} (\delta G_{dB})^2 + (\delta ENR)^2 \right)^2 \right)^{1/2} \tag{14}$$

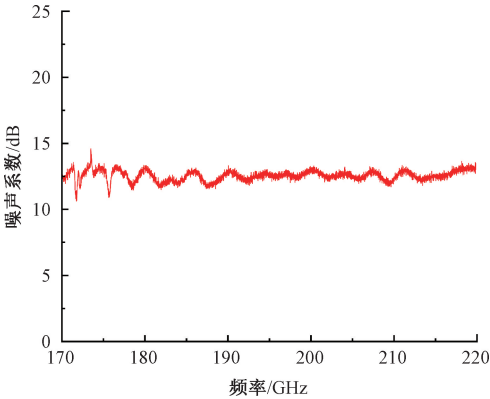


图 5 170~220 GHz 混频器的噪声系数  
Fig. 5 Noise figure of 170~220 GHz mixer

式中: $\mu_1$  为待测器件和接收机系统级联引入的不确定度分量; $\mu_2$  为接收机系统引入的不确定度分量; $\mu_3$  为测量待测器件的增益引入的不确定度分量。由于该系统在测量器件噪声系数过程中,系统一直处于运行状态,所以由噪声源超噪比引起的不确定度  $\delta ENR$  为噪声源的 5 h 运行稳定度 0.35 dB, $\delta NF_{12}$ 、 $\delta NF_1$  和  $\delta G_{dB}$  分别为接收机系统与待测器件级联的噪声系数  $NF_{12}$ 、待测器件的噪声系数  $NF_1$  以及待测器件的增益  $G_{dB}$  引起的不确定度。 $\delta NF_{12}$  计算过程如下:实验记录了 32 组测得的  $NF_{12}$  值,统计分析每个频点的标准差,即可获得每个频点对应的  $\delta NF_{12}$ 。

根据混频器噪声系数测量实验结果,使用式 (12) 对测量不确定度进行计算,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,其噪声系数的测量不确定度<0.48 dB,混频器噪声系数的测量结果具有一定参考价值。

表 3 不确定度  $U$  计算结果  
Table 3 Uncertainty  $U$  calculation result

频率/GHz	$\delta NF_{12}/\text{dB}$	$\delta NF_1/\text{dB}$	$\delta G_{\text{dB}}/\text{dB}$	$F_1$	$F_2$	$F_{12}$	$G$	$U$
170	0.12	0.14	0.13	20.31	1.94	20.64	2.56	0.38
180	0.18	0.18	0.18	21.00	1.89	21.32	2.05	0.40
190	0.15	0.16	0.12	19.50	1.90	19.94	2.11	0.39
200	0.22	0.22	0.18	20.42	1.90	20.73	1.95	0.48
210	0.21	0.21	0.16	18.71	1.95	19.10	2.15	0.42
220	0.17	0.17	0.16	23.56	1.94	23.96	1.86	0.40

3 结 论

本文针对传统固态噪声源中高频带宽受限和输出不平坦等问题,提出了一种基于光子学的高性能太赫兹噪声源实现方案。通过两束非相干光在高速光电探测器上进行混频,提升了噪声源的超噪比和功率谱平坦性。此

外,研制了光子太赫兹噪声源样机,在 140~220 GHz 频率范围内产生最高超噪比 47 dB、平坦度为 $\pm 2.0$  dB 的太赫兹噪声。光子太赫兹噪声源的研制为宽频带、高性能噪声信号的生成提供了全新的解决方案,提升了我国噪声源的最高工作频率,为高频段太赫兹器件的研发、测试与优化提供了重要的技术支持。

## 参考文献

- [1] MITTLEMAN D M. Perspective: Terahertz science and technology [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(23):230901.
- [2] 曹丙花,孙凤山,范孟豹,等. 基于异常主导损失的残差跨域网络热障涂层太赫兹测厚方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(11):287-299.
- CAO B H, SUN F SH, FAN M B, et al. Terahertz based thickness measurement of thermal barrier coatings using the cross-domain residual network with an anomaly-dominant loss [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(11):287-299.
- [3] WANG Y L, QI F, LIU Z Y, et al. Wideband method to enhance the Terahertz penetration in human skin based on a 3-D printed dielectric rod waveguide [J]. *IEEE Transactions on Terahertz science and Technology*, 2019, 9(2):155-164.
- [4] 周子悦,年夫顺,孙超. 基于调频连续波的太赫兹透视测距技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(11):143-151.
- ZHOU Z Y, NIAN F SH, SUN CH. Terahertz perspective ranging technology based on frequency modulated continuous wave [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37(11):143-151.
- [5] TIAN Y, DONG B, LI Y, et al. Photonics-assisted THz wireless communication enabled by wide-bandwidth packaged back-illuminated modified uni-traveling-carrier photodiode[J]. *Opto-Electronic Science*, 2024, 3(7):230051-1-230051-10.
- [6] ABBASI N A, MOLISCH A F, ZHANG J C. Measurement of directionally resolved radar cross section of human body for 140 and 220 GHz bands[C]. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops(WCNCW). IEEE, 2020:1-4.
- [7] SALMANOGLI A, SIRAT V S. Design of ultra-low noise amplifier for quantum applications (QLNA) [J]. *Quantum Information Processing*, 2024, 23(3):91.
- [8] KANTANEN M, WEISSBRODT E, VARIS J, et al. Active cold load MMICs for Ka-, V-, and W-bands[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, 9(8):742-747.
- [9] TARASOV M, GUNBINA A, CHEKUSHKIN A, et al. Fast variable-temperature cryogenic blackbody sources for calibration of THz superconducting receivers [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(14):7349.
- [10] 周刚. 太赫兹频段噪声源研制[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
- ZHOU G. The development of Terahertz band noise source[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [11] SEO M, AHMED A S H, SOYLU U, et al. A 200 GHz InP HBT direct-conversion LO-phase-shifted transmitter/receiver with 15 dBm output power [C]. 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). IEEE, 2021:378-381.
- [12] DONG S, SHARMA N, LI S, et al. A 140GHz RF beamforming phased-array receiver supporting > 20dB IRR with 8GHz channel bandwidth at low if in 22nm FDSOI CMOS [C]. 2023 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). IEEE, 2023:293-296.
- [13] ZHAO R, ZHANG Z, ZHANG Y, et al. Design and implementation of 50GHz-110GHz ultra-broadband noise source[C]. 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2022:1-3.
- [14] LAUNDRIE A. Noise-related technologies climb toward THz territory [J]. *Microwave Journal*, 2024, 67(3):18-30.
- [15] GHANEM H, LEPILLIET 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.
- [16] 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 Y H, GUO Y, WANG Y C, et al. Generation of 130-170 GHz flat millimeter-wave noise signal [J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2022, 52(11):2155-2162.
- [17] YAO J. Microwave photonic systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(20):6595-6607.
- [18] 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.
- [19] WARNICK K F. Noise figure of an active antenna array and receiver system[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2022, 21(8):1607-1609.
- [20] PARVEG D, VARONEN M, SAFARIPOUR A, et al. An mm-wave CMOS I-Q subharmonic resistive mixer for wideband zero-IF receivers [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, 30(5):520-523.
- [21] 陶星宇,刘文杰,孙粤辉,等. 太赫兹混频器噪声系数

测量[J]. 中国光学(中英文),2024,17(4): 943-949.

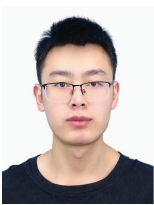
TAO X Y, LIU W J, SUN Y H, et al. Terahertz mixer noise figure measurement [J]. Chinese Optics, 2024, 17(4): 943-949.

[22] 纪东峰,代鲲鹏,王维波,等. 基于平面肖特基二极管的 220GHz~330GHz 分谐波混频器[J]. 空间电子技术,2024,21(4):71-76.

JI D F, DAI K P, WANG W B, et al. A 220GHz ~ 330GHz sub-harmonic mixer based on planar Schottky diode[J]. Space Electronic Technology, 2004, 21(4): 71-76.

[23] DUNSMORE J. Noise figure verification of Y-factor and cold source methods[C]. 2017 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF). IEEE, 2017: 1-4.

作者简介



宋宇辉,2023 年于武汉轻工大学获得学士学位,现为广东工业大学硕士研究生,主要研究方向为光子太赫兹噪声源研制。

E-mail: 13678651029@163.com

**Song Yuhui** received his B. Sc. degree from Wuhan Polytechnic University in 2023.

Now he is a M. Sc. candidate at Guangdong University of Technology. His main research interests include the development of photonic terahertz noise source.



王云才(通信作者),1986 年于南开大学获得学士学位,1994 年和 1997 年于中国科学院西安光学精密机械研究所分别获得硕士学位、博士学位,现为广东工业大学特聘教授,主要研究方向包括半导体激光器的非线性动力学及其应用、基于半导体激光器的混沌保密通信以及太赫兹波信号的生成与应用。

E-mail: wangyc@gdut.edu.cn.

**Wang Yuncai** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nankai University in 1986, M. Sc. degree and Ph.D. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS in 1994 and 1997 respectively. Now he is specially appointed professor in Guangdong University of Technology. His main research interests include nonlinear dynamics of semiconductor lasers and its applications, chaos secure communication based on semiconductor lasers, and terahertz wave signals generation and application.