

文章编号: 2095-4980(2022)09-0927-07

## 非相干光子辅助太赫兹通信系统综述

张丽瑶<sup>1</sup>, 蔡沅成<sup>\*1,2</sup>, 朱敏<sup>\*1,2</sup>, 孙梦凡<sup>1</sup>, 梁胜<sup>1</sup>, 余建军<sup>2</sup>

(1.东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096; 2.紫金山实验室 普适通信研究中心, 江苏 南京 211111)

**摘要:** 太赫兹通信技术以其丰富的频谱资源已成为未来 6G 移动通信实现“通信全频谱”的关键候选技术。由于结构简单、易集成、低成本和低功耗等独有优势, 基于包络检波方式的非相干光子辅助太赫兹通信系统受到研究者的广泛关注与青睐。本文在总结非相干光子辅助太赫兹通信系统的结构、特点及其涉及的关键技术的基础上, 介绍了近几年来国内外有关太赫兹包络检波器和基于包络检波器的非相干光子辅助太赫兹通信系统的研究现状和突出成果。此外, 还对基于幅度调制和基于同相正交(IQ)调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统分别进行了详细的论述, 并比较了各自的优缺点。最后, 展望了未来面向 6G 的非相干光子辅助太赫兹通信系统及其关键器件的发展方向。

**关键词:** 太赫兹通信; 包络检波; 非相干; 6G

**中图分类号:** TN928

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021212

## Overview on incoherent photonics-assisted terahertz communication system

ZHANG Liyao<sup>1</sup>, CAI Yuancheng<sup>\*1,2</sup>, ZHU Min<sup>\*1,2</sup>, SUN Mengfan<sup>1</sup>, LIANG Sheng<sup>1</sup>, YU Jianjun<sup>2</sup>

(1.National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2.Pervasive Communication Research Center, Purple Mountain Laboratory, Nanjing Jiangsu 211111, China)

**Abstract:** Terahertz communication has become one of the key candidate techniques for future 6G mobile communication to realize "communication with full spectra" because of its rich spectrum resources. Due to the unique advantages such as simple structure, easy integration, low cost and low power consumption, the incoherent photonics-assisted terahertz communication system based on envelope detection technique has been widely concerned and favored by the researchers. By summarizing the structure, characteristics and key techniques of incoherent photonics-assisted terahertz communication systems, current research status and outstanding achievements of the terahertz envelope detectors and the incoherent photonics-assisted terahertz communication systems at home and abroad in recent years are introduced. In addition, the incoherent photonics-assisted terahertz communication system based on amplitude modulation and In-phase Quadrature(IQ) modulation are discussed in detail, and the advantages and disadvantages of each system are also compared. Finally, the future development directions of 6G-oriented incoherent photonics-assisted terahertz communication systems and the crucial devices are expected.

**Keywords:** terahertz communication; envelope detection; incoherent; 6G

5G 的普及开启了万物互联的新时代, 基于 5G 衍生的无人工厂、远程医疗、全息交互等新业务与新场景的不断出现, 必然使得无线数据流量急剧增长, 现有的 5G 技术势必难以满足这种快速增长的数据需求。为了迎接未来的挑战, Beyond 5G 和 6G 的概念引起了各国的广泛关注, 而太赫兹波段丰富的频谱资源和独有特性, 使得太赫兹无线通信技术成为极具潜力的 6G 关键使能技术<sup>[1]</sup>。

基于太赫兹信号的产生方式, 太赫兹通信系统可分为全电子太赫兹通信系统和光子辅助太赫兹通信系统。

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62101126); 江苏省重点研发计划资助项目(BE2020012); 江苏省科技成果转化专项资助项目(BA2019026)

\*通信作者: 蔡沅成 email:caiyuancheng@pmlabs.com.cn; 朱敏 email:minzhu@seu.edu.cn

全电子太赫兹通信系统是通过倍频等操作,将工作频段搬移至太赫兹频段<sup>[2]</sup>。但是在设计与工艺的限制下,基于倍频方式产生的太赫兹信号频率很难超过 1 THz,从而限制了全电子太赫兹通信系统的发展<sup>[3]</sup>。而在光子辅助太赫兹通信系统中,太赫兹信号的产生主要基于光外差拍频产生,不仅信号频率高,且频率范围可调,可以满足整个太赫兹波段频率的要求。在这样的背景下,光子辅助太赫兹通信成为未来太赫兹无线通信的重要研究方向。按照太赫兹信号检测方式的不同,光子辅助太赫兹通信系统又可以划分为相干和非相干光子辅助太赫兹通信系统。相干与非相干的概念体现在接收端太赫兹信号的不同下变频方式,所以在同样的太赫兹频率和大气环境中传输时,相干和非相干结构太赫兹通信在大气中的衰减基本保持一致。其中相干光子辅助太赫兹通信系统的发射机主要基于同相正交(IQ)矢量调制,接收机采用基于混频下变换的相干探测方式实现太赫兹信号的接收。一方面由于相干探测必须具备一个本振信号源,但是目前本振振荡频率很难达到太赫兹信号混频的要求,增加了成本和实现难度;另一方面,由于相干技术在相位恢复时需要复杂的数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)算法,会导致模块化封装后功耗过高,同时由于需要的器件多且结构复杂,因此不容易集成,难以满足 6G 低成本、低功耗和广连接的需求<sup>[4]</sup>。对于非相干光子辅助太赫兹通信系统,发射机一般基于幅度/强度调制,接收机中太赫兹下变频则采用基于包络检波的非相干探测方式。相比于相干光子辅助太赫兹通信系统,一方面这种太赫兹信号的接收不需要本振源等器件,因此结构简单,方便维护,在大规模、高密度部署时不会导致过高的成本开销;另一方面包络检波器对光外差拍频引起的相位噪声不敏感,因此无需复杂的 DSP 算法,从而不易引起高功耗问题。综上所述,相对于相干方式,非相干光子辅助太赫兹通信系统在未来 6G 通信技术中的应用更具潜力。

## 1 太赫兹包络检波器研究进展

作为非相干光子辅助太赫兹通信系统核心器件之一,包络检波器可直接将高频太赫兹信号转变为基带信号。与其他平方律元件相比,肖特基二极管具有结构简单、带宽大、灵敏度高等优势,目前已经成为使用最广泛的太赫兹包络检波器。表 1 总结了包络检波器最新的研究成果。

表 1 近几年太赫兹包络检波器最新的研究成果

Table 1 Research results of some terahertz envelope detectors in recent years

organization	frequency/GHz	sensitivity/(V/W)	references
VDI(Virginia Diodes Inc.)	170~300	2 400	[5]
	500~750	1 000	[5]
	1 100~1 700	100	[5]
NICT	220~330	1 400	[6]
Lille1 University	0~220	1 700	[7]
Southeast University	110~170	600	[8]
University of Electronic Science and Technology of China	220	1 200	[9]
	500~750	1 500	[10]
Institute of Microelectronics of the Chinese Academy	260~280	1 400	[11]
China Academy of Engineering Physics	315~357	1 400	[12]

国外 VDI 公司作为全球最好的砷化镓肖特基平板二极管的提供商之一,截止目前已经可以提供 50~1 700 GHz 的检波器。在 750 GHz 频段内,VDI 公司提供的产品可达到 1 000 V/W 的典型灵敏度<sup>[5]</sup>。国内,2017 年中国工程物理研究院完成了 340 GHz 零偏置波导检波器的设计,在 315~357 GHz 频率范围内实现了 1 400 V/W 的典型灵敏度<sup>[12]</sup>。总体来说,在包络检波器这方面的研究国内与国外还存在略微差距。

## 2 基于幅度/强度调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统研究进展

基于幅度/强度调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统如图 1 所示,在发送端基于强度调制器(intensity modulator)对两个激光器(External Cavity Laser, ECL)产生的两束激光进行电光调制,从而将基带信号(baseband signal)调制到对应频段,如图中(b)所示。信号光经过放大后通过光纤传输,然后在单行载流子光电探测器(Uni-Traveling-Carrier Photo-Diode, UTC-PD)处执行拍频,从而产生太赫兹信号,信号经过天线发射与无线传输后,在接收端利用包络检波器(SBD)或功率探测器直接将太赫兹信号下变频为基带信号。这类系统虽然结构简单,但是只能利用信号的幅度来携带信息,频谱效率低,且系统通信速率与传输容量受到光纤色散和系统其他各种失真的限制。表 2 总结了近年来具有代表性的基于强度调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统研究成果,表中的 error-free 表示无差错传输。

早在 2009 年,基于图 1 所示结构,日本电报电话公司(NTT)实现了 0.25 THz 室内通信实验系统,其在 0.5 m

的距离上实现了 8 Gbit/s 的太赫兹信号的无线传输<sup>[13]</sup>。随着太赫兹器件与通信技术的发展，研究人员在光子辅助信号生成方案、包络检波器等多个维度提升太赫兹通信系统的性能。2013 年，我国中科院上海微系统与信息技术研究所基于太赫兹量子阱探测器(Terahertz Quantum-Well Photodetectors, THz QWP)搭建的非相干光子辅助太赫兹通信系统，在 4.1 THz 载频上实现了 1 Mbit/s 的通信速率，无线传输距离为 2.2 m<sup>[20]</sup>；同年日本大阪大学基于偏振复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)搭建的非相干探测光子辅助太赫兹通信系统在 300 GHz 载频上把数据速率提高到 48 Gbit/s，无线传输的距离约为 1 m，这代表了当时基于包络检波非相干光子辅助太赫兹通信系统的最高水平<sup>[18]</sup>。

表 2 近几年基于强度调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统研究成果

Table2 Part of the research results of incoherent photonics-assisted terahertz communication systems based on intensity modulation in recent years

organization	frequency	wireless transmission distance/m	fiber transmission distance/km	bit rate	modulation format/ technique	bit error rate	year	references
NTT	250 GH	0.5	-	8 Gbit/s	ASK/UTC-PD	$10^{-10}$	2009	[13]
	300 GHz	0.5	-	12.5 Gbit/s	ASK/UTC-PD	$10^{-12}$	2010	[14]
	300 GHz	0.5	-	24 Gbit/s	ASK/UTC-PD	$10^{-10}$	2012	[15]
Osaka University & NTT	300 GHz	0.5	-	2 Gbit/s	ASK/UTC-PD	$10^{-10}$	2009	[16]
	300 GHz	0.5~1	-	30 Gbit/s	ASK/UTC-PD	$10^{-11}$	2013	[17]
	300 GHz	0.5~1	-	40 Gbit/s	OOK/ UTC-PD	$10^{-11}$	2013	[18]
	300 GHz	0.5~1	-	48 Gbit/s	PDM	error-free	2013	[18]
Lille1 University	400 GHz	2	-	22 Gbit/s	UTC-PD	-	2013	[19]
Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology	4.1 THz	2.2	-	1 Mbit/s	OOK/THz QWP	-	2013	[20]
IMEP-LAHC	100 GHz	-	-	1 Gbit/s	ASK	-	2015	[21]
University of Duisburg-Essen	110 GHz	40	25	1 Gbit/s	NRZ-OOK	$10^{-10}$	2015	[22]

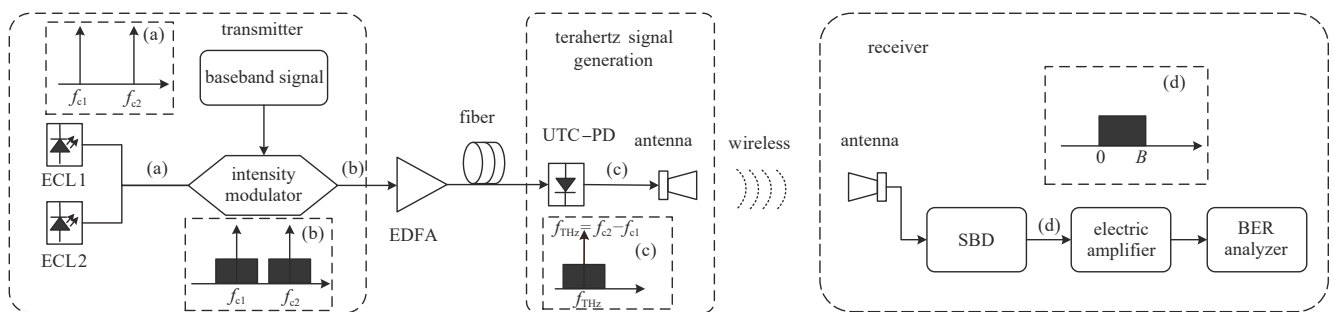


Fig.1 Incoherent photonics-assisted terahertz communication system based on intensity modulation

图 1 基于强度调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统图

### 3 基于 IQ 调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统研究进展

基于 IQ 正交矢量调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统结构如图 2 所示，IQ 调制的信号一般为复数基带信号，其中 I 和 Q 分别代表调制信号的实部和虚部。发送端电光调制器一般采用双驱动马赫-曾德尔调制器或 IQ 调制器(IQ modulator)，电光调制器将信号调制到光载波上，通过设置不同的直流偏置和信号驱动方式，可以产生双边带调制或单边带调制信号。调制信号在经过光纤传输后，通过光耦合器(Optical Coupler, OC)将信号光和本振光进行耦合并基于 UTC-PD 执行拍频以产生太赫兹信号，信号经过天线发射与无线传输后，在接收端利用肖特基势垒二极管包络检波器直接将太赫兹信号下变频为基带信号。

表 3 总结了近年来具有代表性的基于 IQ 调制的非相干太赫兹通信系统的研究成果。表 3 中，QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)为正交相移键控；QAM(Quadrature Amplitude Modulation)为正交幅度调制；KK 和 Volterra 是用于高阶调制格式的信号在包络检波后相位恢复 DSP 算法；FEC BER 为进行前向纠错前的误码率。

在非相干光子辅助太赫兹通信系统中，IQ 正交矢量调制方式还可以通过单边带传输信息，单边带调制格式不仅能提供较高的频谱效率和通信容量，同时还支持良好的抗色散诱导的功率衰落特性。然而，在包络检波时，一方面，平方律探测只能恢复信号的幅度信息，而信号的相位信息则被丢失；另一方面，平方律操作会产生信号与信号拍频串扰(Signal-Signal Beat Interference, SSBI)，如图 2 中的(d)所示，在没有设置保护间隔或保护间隔不够的情况下，SSBI 落在信号带内，其频谱与目标信号重叠，这将严重影响系统的传输性能。

表3 近几年基于IQ调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统研究成果

Table3 Part of the research results of incoherent photonics-assisted terahertz communication systems based on IQ modulation in recent years

organization	frequency/GHz	wireless transmission distance/m	fiber transmission distance/km	bit rate	modulation format/technique	bit error rate	year	references
IMEP-LAHC	100.0	-	-	400 Mbit/s	QPSK	-	2015	[21]
National Chiao Tung University	103.5	2.0	25	40 Gbit/s	16QAM	$<3.8 \times 10^{-3}$	2015	[23]
University of Duisburg-Essen	325.0	5.0	2	59 Gbit/s	64QAM	$<3 \times 10^{-3}$	2017	[24]
University College London	100.0	0.5	10	44 Gbit/s	16QAM/KK	$<3.1 \times 10^{-3}$	2018	[25]
	300.0	110.0	-	100 Gbit/s	QPSK/KK	$<2.6 \times 10^{-3}$	2018	[26]
Karlsruhe Institute of Technology	300.0	110.0	-	110 Gbit/s	16QAM/KK	$<2 \times 10^{-2}$	2019	[27]
	300.0	110.0	-	115 Gbit/s	16QAM/KK	$<1.25 \times 10^{-2}$	2020	[28]
Zhejiang University	310.0	3.0	-	60 Gbit/s	16QAM/Volterra	$<2 \times 10^{-2}$	2020	[29]

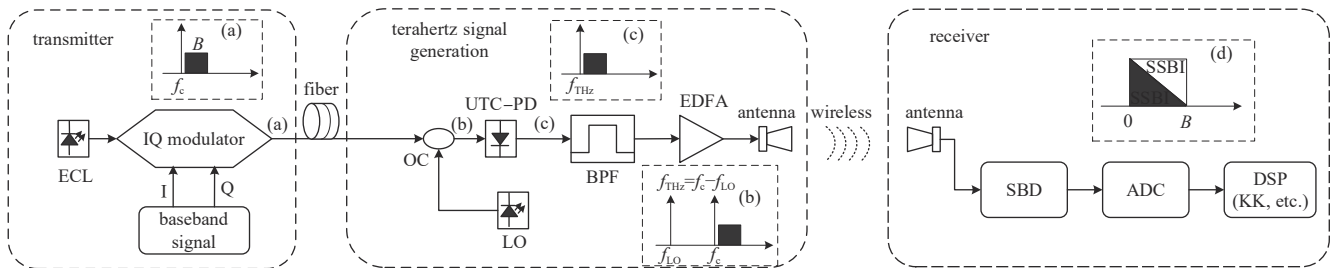


Fig.2 Diagram of incoherent photonics-assisted terahertz communication system based on IQ modulation

图2 基于IQ调制的非相干光子辅助太赫兹通信系统图

为了消除SSBI的影响，研究者在DSP算法上做出了长足的努力，如，2020年，我国浙江大学张鹿等使用Volterra非线性滤波器，采用双边带信号调制格式，基于双驱动马赫-曾德尔调制器和零偏置肖特基二极管在310 GHz载波频率上实现了速率为60 Gbit/s、无线传输距离为3 m的THz通信系统<sup>[29]</sup>。

如何在包络检波非相干探测系统实现矢量信号相位的恢复是一个难点，这关系到非相干光子辅助太赫兹通信系统能否从一维幅度调制扩展到二维幅度和相位同时调制的问题。Kramers-Kronig(KK)算法的提出可以解决这一难题，它在2016年首次被应用于直接探测光通信系统中，可实现单边带调制信号SSBI的消除与矢量信号的重建<sup>[30]</sup>。KK算法的原理在于：在最小相位条件下，基于希尔伯特变换可以通过信号的幅度信息恢复丢失的相位信息，从而重建整个矢量信号。这种方式既在原理上消除了SSBI的影响，同时基于重建的矢量信号，可以在接收端DSP中更好地对系统存在的线性和非线性失真进行补偿。KK算法具体可以表示为：

$$\varphi(t) = p.v. \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\ln[\sqrt{I_{SBD}}(t')]}{\pi(t-t')} dt' = HT \left\{ \ln[\sqrt{I_{SBD}}(t)] \right\} \quad (1)$$

$$s(t) = \left\{ \sqrt{I_{SBD}}(t) \exp[j\varphi_r(t)] - E_0 \right\} \exp(-j2\pi Bt) \quad (2)$$

式中： $p.v.$ 表示积分的柯西主值； $\sqrt{I_{SBD}}(t)$ 表示太赫兹信号经过包络检波探测获得的幅度信息； $\ln[\bullet]$ 表示取对数； $HT\{\bullet\}$ 表示对其进行希尔伯特变换； $\varphi(t)$ 表示由幅度恢复的相位信息； $\sqrt{I_{SBD}}(t) \exp[j\varphi(t)]$ 表示重建的单边带矢量信号； $E_0$ 表示该单边带信号的均值； $B$ 表示单边带信号的带宽。

2018年，英国伦敦大学学院的Luis Gonzalez Guerrero等首次把KK算法用于0.1 THz的太赫兹无线通信系统，通过16QAM单边带调制格式在W波段实现了3.4 bit/s/Hz的高频谱效率<sup>[25]</sup>。从2018年到2020年，卡尔斯鲁厄理工学院对非相干探测包络检波系统中KK接收机的应用进行了深入的研究，提出了改进的广义KK接收机，并在300 GHz的载频上将波特率为30 GBd的QPSK信号以及波特率为15 GBd的16QAM信号以115 Gbit/s的通信速率无线传输了110 m，这是目前报导的非相干光子辅助太赫兹通信系统最高的传输速率和传输距离<sup>[26-28]</sup>。

#### 4 非相干光子辅助太赫兹通信系统发展趋势

纵观近几年来非相干光子辅助太赫兹通信系统的发展历程与成果，不难发现，其正在逐步向更高速率、更远距离和更低功耗的方向发展，同时在小型集成化以及实用化方向上也在不断努力。非相干光子辅助太赫兹通



信系统是一个多学科交叉的复合型技术领域，不仅需要新型通信技术的推动，也需要高性能的太赫兹器件作为基石<sup>[31]</sup>。

#### 4.1 非相干光子辅助太赫兹通信技术发展趋势

借助于KK接收机，非相干光子辅助太赫兹通信系统可以采用高阶矢量调制格式提高系统的通信容量与传输速率。此外，鉴于KK算法支持矢量场信号的重建，这为非相干光子辅助太赫兹通信系统中采用基于矢量调制信号的偏振复用技术提供了可能，从而可进一步提高系统频谱效率和系统容量。因此，未来可以在矢量调制的基础上，结合光偏振复用、波分复用、天线极化复用等技术，同时应用先进的DSP算法来大幅度提升系统的通信容量与传输性能。

太赫兹波段丰富的带宽资源使得太比特量级的超高通信速率成为可能。但是太赫兹频段的路径传播损耗远大于5G毫米波，一方面，随着超大规模天线阵列技术不断取得突破与进展，未来可采用超大规模阵列天线技术来实现太赫兹信号的增强覆盖；另一方面，在不同通信环境下，找到对应的大气传输窗口，避开传输损耗较大的频段<sup>[10]</sup>，从而满足超远距离、超高速率、超大容量的Beyond 5G/6G通信需求。

#### 4.2 非相干光子辅助太赫兹通信系统相关器件发展趋势

目前太赫兹信号广泛基于UTC-PD执行光外差拍频产生，但UTC-PD光电转化效率低从而使得通信距离受限，因此优化设计UTC-PD结构及宽带匹配，提高UTC-PD的响应度和灵敏度是提高UTC-PD整体输出功率水平，提升通信距离的发展方向。

基于肖特基二极管的包络检波器是非相干光子辅助太赫兹通信系统接收机的核心器件，目前包络检波器接收灵敏度仍难以达到大容量、高速率信号的接收要求，从而限制了系统的通信容量。因此从肖特基二极管出发，一方面设计更加精确的二极管模型，从而准确匹配太赫兹信号的物理特性，提高包络检波的抗噪声性能；另一方面从材料、工艺以及DSP算法等角度进行创新，在减小设计复杂性的前提下，使得包络检波器具有更宽的频率范围以及更高的电压响应灵敏度。

## 5 结论

基于包络检波方式的非相干光子辅助太赫兹通信系统具有低成本、低功耗、结构简单、系统稳定以及易于集成等特点，可以满足未来多种新兴场景的数据需求，尤其在支撑未来6G全频谱通信方面具有十分广阔的应用前景。本文在总结与介绍太赫兹包络检波器以及非相干光子辅助太赫兹通信系统研究进展的基础上，展望了未来非相干光子辅助太赫兹通信系统相关技术及其器件的发展方向。可以预见，在通信技术以及相关器件发展的推动下，非相干光子辅助太赫兹通信系统将在Beyond 5G和6G新场景中提供优秀的解决方案。

#### 参考文献：

- [1] 马静艳,张忠皓,李福昌,等. 太赫兹通信关键技术与发展愿景[J]. 邮电设计技术, 2020(4):1-5. (MA Jingyan,ZHANG Zhonghao, LI Fuchang,et al. The key technology and development vision of terahertz communication[J]. Post and Telecommunications Design Technology, 2020(4):1-5.)
- [2] 赵明明,余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6):931-937. (ZHAO Mingming,YU Jianjun. Research status and application prospects of terahertz communication systems[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6):931-937.)
- [3] 姜航,姚远. 高速长距离太赫兹通信系统研究现状与难点综述[J]. 无线电通信技术, 2019,45(6):634-637. (JIANG Hang,YAO Yuan. Summary of research status and difficulties of high speed and long distance terahertz communication system[J]. Radio Communication Technology, 2019,45(6):634-637.)
- [4] 杨鸿儒,李宏光. 太赫兹波通信技术研究进展[J]. 应用光学, 2018,39(1):12-21. (YANG Hongru,LI Hongguang. Research progress of terahertz wave communication technology[J]. Applied Optics, 2018,39(1):12-21.)
- [5] VDI. Designs and produces millimeter wave and terahertz devices,components and systems[EB/OL]. [2021-04-13]. <https://www.vadiodes.com/en/products/detectors>.
- [6] PATRASHIN M,SEKINE N,KASAMATSU A,et al. Zero-bias GaAsSb/InAlAs/InGaAs tunnel diode detectors for 220~330 GHz range[C]// 26th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials(IPRM). Montpellier,France:IEEE, 2014:1-2.

- [7] NADAR S,ZAKNOUNE M,WALLART X,et al. Sub-THz zero-bias detector with high performances based on Heterostructure Low Barrier Diode(HLBD)[C]// 2016 41st International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz waves(IRMMW-THz). Copenhagen,Denmark:IEEE, 2016:1-2.
- [8] 姚常飞,周明,罗运生,等. 基于肖特基势垒二极管的太赫兹固态倍频源和检测器研制[J]. 电子学报, 2013,41(3):438-443. (YAO Changfei,ZHOU Ming,LUO Yunsheng,et al. Development of terahertz solid-state frequency doubler source and detector based on Schottky barrier diode[J]. Acta Electronica Sinica, 2013,41(3):438-443.)
- [9] 梅腾达,张勇. 220 GHz 检波器的设计[J]. 微波学报, 2014,30(S1):546-548. (MEI Tengda,ZHANG Yong. Design of 220 GHz detector[J]. Journal of Microwaves, 2014,30(S1):546-548.)
- [10] 郑鹏辉. 基于肖特基势垒二极管的 600 GHz 检波器研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (ZHENG Penghui. Research on 600 GHz detector based on Schottky barrier diode[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology, 2017.)
- [11] ZHANG Jianjun,ZHOU Jingtao,YANG Chengyue,et al. A 270 GHz high performance waveguide detector utilizing a zero-bias Schottky diode[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015,34(1):1-5.
- [12] 田遥岭,蒋均,黄昆,等. 0.34 THz 肖特基二极管高速 OOK 信号直接检波器[J]. 红外与激光工程, 2017,46(8):205-211. (TIAN Yaoling,JIANG Jun,HUANG Kun,et al. 0.34 THz Schottky diode high-speed OOK signal direct detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017,46(8):205-211.)
- [13] SONG H J,AJITO K,HIRATA A,et al. 8 Gbit/s wireless data transmission at 250 GHz[J]. Electronics Letters, 2009,45(22):1121-1122.
- [14] SONG H J,AJITO K,WAKATSUKI A,et al. Terahertz wireless communication link at 300 GHz[C]// 2010 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics. Montreal,QC,Canada:IEEE, 2010:42-45.
- [15] SONG H J,AJITO K,MURAMOTO Y,et al. 24 Gbit/s data transmission in 300 GHz band for future terahertz communications[J]. Electronics Letters, 2012,48(15):953-954.
- [16] NAGATSUMA T,SONG H J,FUJIMOTO Y,et al. Giga-bit wireless link using 300-400 GHz bands[C]// 2009 International Topical Meeting on Microwave Photonics. Valencia,Spain:IEEE, 2009:1-4.
- [17] NAGATSUMA T. Generating millimeter and terahertz waves by photonics for communications and sensing[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest(MTT). Seattle,WA,USA:IEEE, 2013:1-3.
- [18] NAGATSUMA T,HORIGUCHI S,MINAMIKATA Y,et al. Terahertz wireless communications based on photonics technologies[J]. Optics Express, 2013,21(20):23736-23747.
- [19] DUCOURNAU G,SZRIFTGISER P,PAVANELLO F,et al. 22 Gbps wireless communication system at 0.4 THz[C]// 38th International Conference on Infrared, Millimeter,and Terahertz Waves(IRMMW-THz). Mainz,Germany:IEEE, 2013:1-2.
- [20] 陈镇,谭智勇,王长,等. 基于 THz QCL 和 THz QWP 的数字通信演示系统[J]. 红外与激光工程, 2013,42(10):2796-2799,2852. (CHEN Zhen,TAN Zhiyong,WANG Chang,et al. Digital communication demonstration system based on THz QCL and THz QWP[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(10):2796-2799,2852.)
- [21] KHAYATZADEH R,ELWAN H H,POETTE J,et al. 100 GHz RoF system based on two free running lasers and non-coherent receiver[C]// International Topical Meeting on Microwave Photonics(MWP). Paphos,Cyprus:IEEE, 2015:1-4.
- [22] CHUENCHOM R,ZOU X,RYMANOV V,et al. Integrated 110 GHz coherent photonic mixer for CRoF mobile backhaul links[C]// 2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics(MWP). Paphos,Cyprus:IEEE, 2015:1-4.
- [23] LIN C T,WU M F,HO C H,et al. W-band OFDM Radio-over-Fiber system with power detector for vector signal down-conversion[J]. Optics Letters, 2015,40(11):2477-2480.
- [24] HERMELO M F,SHIH P T B,STEEG M,et al. Spectral efficient 64-QAM-OFDM terahertz communication link[J]. Optics Express, 2017,25(16):19360-19370.
- [25] GUERRERO L G,SHAMS H,FATADIN I,et al. Spectrally efficient SSB signals for W-band links enabled by Kramers-Kronig receiver[C]// 2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition(OFC). San Diego,CA,USA:IEEE, 2018:1-3.
- [26] HARTER T,FÜLLNER C,KEMAL J N,et al. 110 m THz wireless transmission at 100 Gbit/s using a Kramers-Kronig Schottky barrier diode receiver[C]// 2018 European Conference on Optical Communication(ECOC). [S.l.]:IEEE, 2018:1-3.
- [27] HARTER T,FÜLLNER C,KEMAL J N,et al. Generalized Kramers-Kronig receiver for 16QAM wireless THz transmission at 110 Gbit/s[C]// 45th European Conference on Optical Communication(ECOC 2019). Dublin,Ireland:IET, 2019:1-4.
- [28] HARTER T,FÜLLNER C,KEMAL J N,et al. Generalized Kramers-Kronig receiver for coherent terahertz communications[J]. Nature Photonics, 2020,14(10):601-606.

- [29] ZHANG L, QIAO M, WANG S, et al. Nonlinearity-aware optoelectronic terahertz discrete multitone signal transmission with a zero-bias diode[J]. Optics Letters, 2020,45(18):5045-5048.
- [30] MECOZZI A, ANTONELLI C, SHTAIF M. Kramers-Kronig coherent receiver[J]. Optica, 2016,3(11):1220-1227.
- [31] 陈智, 张雅鑫, 李少谦. 发展中国太赫兹高速通信技术与应用的思考[J]. 中兴通讯技术, 2018,24(3):43-47. (CHEN Zhi, ZHANG Yaxin, LI Shaoqian. Thinking about the development and application of high-speed terahertz communication technology in China[J]. ZTE Technology, 2018,24(3):43-47.)

#### 作者简介:

张丽瑶(1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为光子毫米波/太赫兹通信. email: zhangliyao@seu.edu.cn.

蔡沅成(1988-), 男, 博士, 在站博士后, 主要研究方向为微波光子学、太赫兹无线通信技术.

朱敏(1980-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为光网络技术、太赫兹无线通信技术.

孙梦凡(1997-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为光子太赫兹通信系统中多维复用技术.

梁胜(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为光子太赫兹通信系统中单边带调制技术.

余建军(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高速光纤通信技术、光纤无线融合通信.

(上接第926页)

#### 作者简介:

马毛旦(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为纳米结构器件、功率器件封装及可靠性. email: 2372150203@qq.com.

曹艳荣(1980-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为VLSI器件、新材料器件、电子封装及其可靠性.

吕航航(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性.

王志恒(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性.

任晨(1996-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性.

张龙涛(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性.

吕玲(1984-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为宽禁带半导体器件工艺、宽禁带半导体材料表征及宽禁带半导体材料与器件辐照效应.

郑雪峰(1979-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为宽禁带半导体材料与器件、半导体器件可靠性研究、半导体光电器件与探测器、新型半导体存储器件及芯片设计.

马晓华(1973-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为半导体器件及其可靠性、宽禁带半导体材料、器件及固态微波集成电路设计.