

宽带高功率三维异构集成微波光子探测器

许向前^{1,2}, 龚广宇², 孙雷², 李宇², 康晓晨², 李思敏¹, 潘时龙^{1*}

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 211106;

2. 中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北石家庄, 050051)

摘要: 本研究采用三维异构集成技术实现单行载流子光电二极管与微波集成电路芯片堆叠集成, 研制出一款微波光子应用的高功率、宽带探测器芯片。通过优化单行载流子光电二极管的材料掺杂和外延工艺, 显著提高了功率承受能力; 采用集成背入射透镜和增设金属反射层的设计, 有效提升了响应度; 通过提取光电二极管的精确模型并采用阻抗补偿及宽带匹配电路设计技术, 成功增强了宽带特性。将光电二极管芯片倒装集成在微波集成电路芯片上, 大幅减小了芯片互连电路对高频性能的不利影响; 采用高导热率底层芯片的设计, 极大提升了探测器芯片的导热性能和高功率处理特性。研制的三维异构集成光电探测器 1 dB 带宽高达 42 GHz, 射频回波损耗优于 11 dB, 响应度优于 0.85 A/W, 暗电流低于 50 nA, 饱和输入光功率超过 120 mW。三维异构集成微波光子探测器芯片实现了优异的带宽和响应度特性, 该设计方法为微波光子应用提供了创新性的解决方案。

关键词: 微波光子学; 单行载流子光电二极管; 宽带; 高功率; 三维异构集成

中图分类号: TN362

文献标识码: A

Wideband and high power 3D heterogeneous integration photoreceiver

XU Xiang-Qian^{1,2}, GONG Guang-Yu², SUN Lei², LI Yu², KANG Xiao-Chen²,
LI Si-Min¹, PAN Shi-Long^{1*}

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China;

2. The 13th Research Institute, CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: This paper presents an innovative three-dimensional (3D) heterogeneously integrated photoreceiver, which is optimized for analog microwave optical links that demand both wide bandwidth and high input optical power. The key of this design is the uni-traveling-carrier photodiode (UTC-PD), which has been flip-chip integrated onto a microwave integrated circuit submount. This integration approach enhances the photoreceiver's bandwidth and high power handling capabilities. The material doping and epitaxial processes of the UTC photodiode were optimized to augment its power endurance. Meanwhile, the responsivity of the photodiode was improved through the adoption of an integrated back-illuminated lens complemented by the addition of a metallic reflective layer. By establishing a precise model of the photodiode, we have refined the bandwidth characteristic of the photoreceiver using impedance compensation and broadband matching circuit design techniques. Flip-chip bonding the photodiode chip onto the microwave integrated circuit chip has substantially mitigated the impact of interconnect circuits on high-frequency performance. Furthermore, the thermal conductivity and high-power resilience of the detector chip were enhanced via gold-tin alloy micro-bump interconnections and the design of a high thermal conductivity substrate layer. The three-dimensional heterogeneous integrated photoreceiver features a 1-dB bandwidth of 42 GHz, an RF return loss exceeding 11 dB, a responsivity surpassing 0.85 A/W, a dark current below 50 nA, and a saturated input optical power of over 120 mW. By leveraging the distinctive properties of the UTC-PD, our three-dimensional (3D) heterogeneous integrated photoreceiver design achieves superior efficiency and responsiveness, positioning it as a leading solution for cutting-edge microwave photonics applications.

Key words: microwave photonics, uni-traveling carrier photodiode (UTC-PD), wideband, high power, 3D

收稿日期: 2024-04-17, 修回日期: 2024-09-27

Received date: 2024-04-17, Revised date: 2024-09-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2802700)、国家自然科学基金项目(62271249)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program Project (2022YFB2802700), National Natural Science Foundation of China Project (62271249)

作者简介 (Biography): 许向前 (1979-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 主要研究集成微波光子芯片。E-mail: xuxq@cetc13.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: pans@nuaa.edu.cn

引言

随着新一代高速、大容量移动通信的迅猛发展,微波光子技术作为微波与光子技术交汇的前沿领域,在提升信号传输效率和降低系统功耗方面展现出独特的价值。该技术通过结合微波技术的高效传输和光子技术的低损耗特性,为移动通信对高工作频率的追求和应对空间传输损耗的挑战提供了创新解决方案。特别是射频光传技术,将微波信号转换成光信号并利用光纤进行传输,为天线远距离布置、分布式阵列和无线网络广域覆盖等提供了有力支撑,有望给这些领域带来重要的技术进步^[1]。然而,在微波与光信号间的调制与解调过程中,转换损耗成为进一步应用微波光子技术的重大障碍。微波光子探测器的转换效率和饱和输入光功率直接影响着链路转换损耗的大小。为此,研究人员致力于探索新型器件结构,旨在通过技术创新来突破高功率、宽带微波光子探测器设计与性能提升的挑战,以期微波光子技术在现代通信系统中的应用开辟更为广阔的空间^[2-3]。

单行载流子光电二极管(UTC-PD)仅由电子作为载流子,较传统PIN光电二极管具有更高的饱和电流和更快的响应速度,已成为高功率及高速探测器的理想选择。然而单行载流子光电二极管在追求高饱和输入光功率、高响应度和高工作频率这三个关键性能指标过程中,面临着内在的矛盾和技术难题。例如,为了实现高饱和输入光功率,芯片需要能够承受大光电流;高工作频率的实现要求器件具有低的寄生参量和小的感光面积,但这些因素又限制了输入光功率的提高。因此,研究者在提升这些性能指标时,需要在相互矛盾的指标之间找到平衡点^[4-5]。

本文解决了单行载流子光电二极管光生载流子的高速输运机理、材料外延技术、崖层和吸收层厚度设计在内的一系列关键技术挑战,成功研发出高功率光电二极管。基于芯片三维异构集成工艺,突破了芯片间高频互连技术,显著降低了芯片间信号互连寄生特性影响,大幅提升了探测器的工作频率。通过引入芯片高效散热技术,提高了芯片的热导率,增强了微小感光面积和高电流密度的光电二极管芯片的可靠性。因此,本研究实现的宽带、高功率三维异构集成微波光子探测器芯片,在带宽、响应度、饱和输入光功率等关键指标上实现了显著

提升,1 dB带宽超过42 GHz、响应度优于0.85 A/W、暗电流低于50 nA。微波与光子器件三维异构集成的设计方法,为微波光子器件的应用提供了创新性的解决方案。

1 单行载流子光电二极管工艺与器件

1.1 器件结构

当光电二极管输入高功率光信号时,其本征区电场受到空间电荷 Screening 效应等因素的影响,导致光生载流子向耗尽层迁移时,空间电荷在其分布中会形成一个与偏置电场方向相反的电场^[6]。随着耗尽层内载流子数量的减少,导致空间电荷的中和效应,引发电场的变形和二极管光电流的饱和,限制了光电二极管对光功率的承受能力^[7-8]。本研究通过对单行载流子光电二极管的外延层厚度和掺杂浓度进行优化,并采用改进型的梯度结构,有效提高了其对光功率的承受能力及响应速度,以满足高功率、高速微波光子探测器的应用需求。

本研究中,我们设计的单行载流子光电二极管芯片材料结构为500 nm至800 nm厚的P型掺杂的InGaAs吸收层和一个100 nm至300 nm厚的i型非掺杂的InGaAs吸收层,这一结构位于一个400 nm厚的P+掺杂的InP阻挡层与一个10 nm至50 nm厚的N型InP崖层之间。此外,P/N接触层采用重掺杂的InGaAs和InP结构,以形成有效的欧姆接触。为了提升单行载流子光电二极管的频率响应性能,采用湿法刻蚀工艺形成T型结构台面,以降低二极管的结电容和减小欧姆接触电阻。基于InP材料的光电芯片工艺,我们制备了直径20 μm 光敏面的改进型UTC-PD芯片,其结构设计详细展示如下图所示。

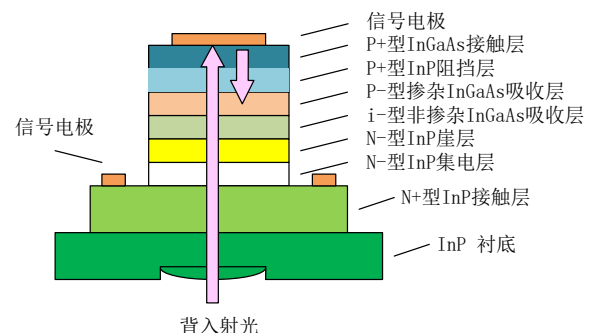


图1 单行载流子光电二极管结构图

Fig. 1 schematic cross-sectional view of the UTC photodiode

1.2 感光面、高响应度设计

面感光型光电二极管的感光面积与寄生结电容成正比,是影响其工作频率的一个关键因素。一般通过减小感光面积来降低结电容,从而提升工作频率^[9-10]。对于微小感光面积的光电二极管,光信号的耦合效率受到感光面尺寸的限制,导致光电响应度低。为了提高光电二极管的响应度,本文采用一体化集成微透镜的设计方案,通过在芯片的背面集成微透镜,有效扩大光电二极管的等效感光面积,将入射光聚焦于光电二极管的感光面,进而提高光响应度。

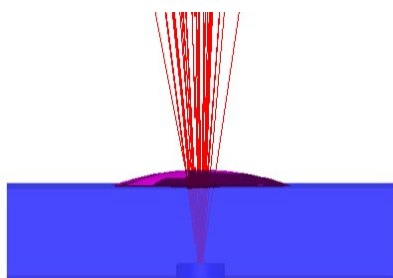


图2 微透镜光路仿真

Fig. 2 The schematic diagram of micro-lens simulation

在本研究中,我们通过在光电二极管的电极层上镀覆高反射率的薄膜来增强其对光信号的吸收效能。入射光穿过PN结吸收层后,透射光信号被反射膜所反射,从而增加了等效的光吸收长度,实现对入射光的二次吸收。该设计方法显著提高了光电二极管对入射光信号的吸收效果,为解决高工作频率和高响应度光电二极管面临的技术挑战提供了一种有效的解决方案。

2 三维异构集成微波光子探测器电路设计

光电器件与微波器件在材料工艺和制备技术等方面存在显著差异。这些差异导致实现单片集成微波光子器件面临较大的技术挑战和较高的成本。虽然光电二极管和微波电路的混合集成技术已被开发,但其集成度低、频率性能不佳,难以满足宽带和高性能应用的需求。近年来基于硅光工艺的单片集成微波光子探测器已取得进展,但在工作频率和饱和输入光功率等关键性能指标上仍存在不足^[11]。为了实现高功率、高工作频率及高响应度的微波光子探测器,本研究基于InP基光电二极管和微波集成电路,采用三维异构集成技术,将单行载流子光电二极管倒装(Flip-chip)到微波集成电路

芯片上,实现性能优异的异构集成的微波光子探测器芯片。

2.1 高导热率设计

高功率光电二极管需具备强大的光电流承受能力、热功率耗散能力。高工作频率光电二极管感光面积小、电极的欧姆接触电阻大,当输入高功率光信号时,产生较大光电流和热量,如果热耗散不足会导致光电二极管温度过高,引发光饱和或热烧毁。因此,增强光电二极管的功率耗散能力,对提升输入光功率能力至关重要。

采用芯片三维异构集成的设计方法,通过采用SiC衬底(热导率400 W/m·K)替代InP衬底(热导率97 W/m·K),显著提高了光电二极管的热导率。使用高导热率的金锡合金微凸点,实现光电二极管与微波集成电路芯片之间的混合键合。该设计显著增强了微波光子探测器的功率耗散能力及其对高输入光功率的处理性能,为提升微波光子探测器的整体性能提供了一种有效途径。

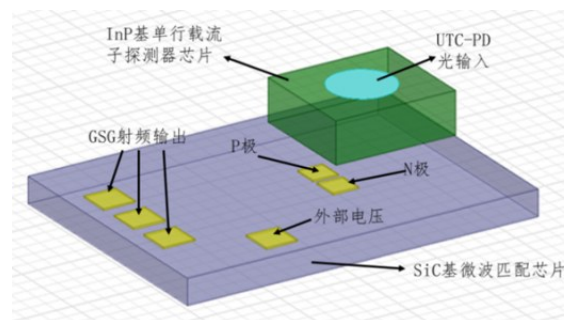


图3 三维异构集成微波光子探测器芯片

Fig. 3 3D heterogeneous integration photoreceiver

2.2 单行载流子光电二极管模型

该模型通过光控电流源(G_s)、PN结电容(C_j)、欧姆接触电阻(R_s)、接触电感(L_s)和电极电容(C_s)等参数,准确表征光电二极管的频率特性。其中,光控电流源(G_s)描述光电二极管的光电转换特性,其中G代表直流增益,T表示与电流增益相关的延时,F为电流增益带宽,f是工作频率。

光电二极管的频率相关跨导 $G(f)$ 可以表达为

$$G(f) = G \times \frac{e^{-j(2\pi fT)}}{1 + j(f/F)} \quad (1)$$

通过引入频率高阶加权来提高等效模型的准确性,采用一阶系数 K_1 、二阶系数 K_2 、以及三阶系数 K_3 修正模型频率特性,光控电流源 G_s 可以通过下述公式进行表达。

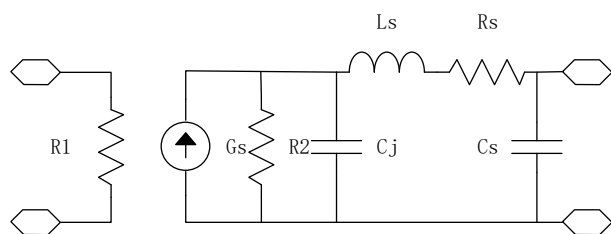


图4 单行载流子光电二极管等效模型

Fig. 4 Equivalent model of UTC diode

$$G_s = G(f) - K_1 \times f - K_2 \times f^2 - K_3 \times f^3 \quad (2)$$

我们利用微波光子参数测试平台测量光电二极管的频率响应,采用GSG共面波导结构载体,将光电二极管倒装焊接于该载体上,进行光学及微波探针测试。根据芯片测试数据,通过频率高阶加权拟合模型参数,建立光电二极管精确的等效模型。在40 GHz测试范围内,模型的幅度响应误差小于 ± 0.1 dB,相位误差小于 $\pm 0.8^\circ$,光电转换的频率特性误差小于 ± 0.5 dB。该等效模型为理解和预测光电二极管的性能提供了重要工具,为微波光子探测器的设计与优化提供了基础。

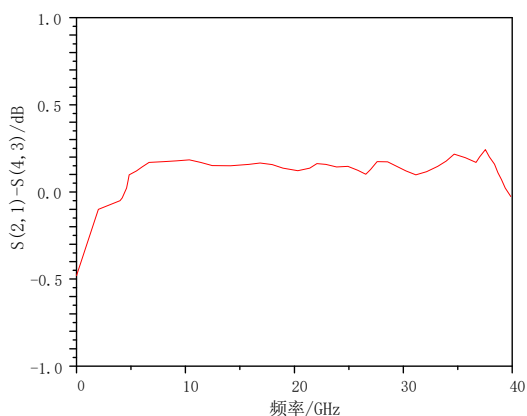


图5 UTC-PD模型频率特性误差

Fig. 5 UTC-PD Equivalent model frequency characteristic error

2.3 微波光子探测器电路设计

基于单行载流子光电二极管的等效模型,采用如下图所示的微波光子探测器原理框图,设计宽带阻抗匹配电路,采用负载电阻R和串联电感L₁实现高频阻抗补偿技术,有效降低电路高频寄生影响、优化高频响应,扩展探测器芯片的工作频率。基于微波单片集成电路工艺,在微波集成电路上集成光电二极管的电源和宽带阻抗匹配电路。

基于(chip to wafer)晶圆级异构集成工艺,在微

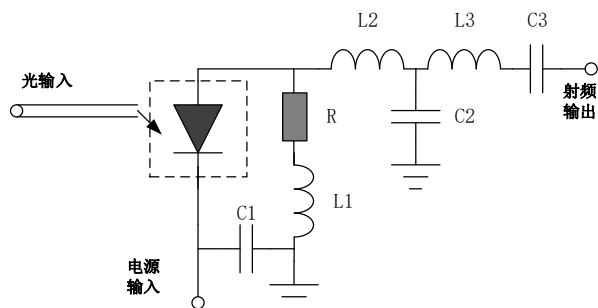


图6 微波光子探测器原理框图

Fig. 6 Photoreceiver device schematic.

波集成电路晶圆上制备金锡合金微凸点,并利用芯片混合键合技术实现光电二极管与微波集成电路芯片的倒装集成,构建异构集成微波光子探测器芯片。采用仅5 μm高度的微凸点替换传统平面混合集成封装中约300 μm长度键合金丝,显著降低了光电二极管与微波电路间互连线高频寄生特性的影响。基于三维异构集成的微波光子探测芯片设计,极大拓展了工作频率,实现了平坦的光电频率响应。

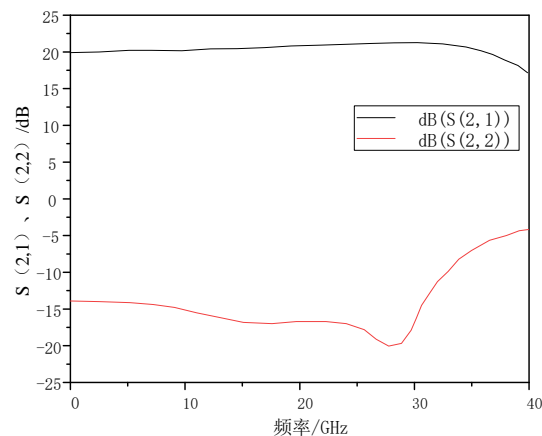


图7 探测器芯片仿真频率响应

Fig. 7 Simulated frequency response of the photoreceiver

2.3 光电混合封装设计

设计采用斜面单模光纤与集成微透镜探测器芯片进行光耦合,通过上述探测器芯片创新性的设计技术,提升了微小感光面探测器芯片的等效感光面积,提升了探测器芯片与光纤的耦合效率,显著降低了光纤耦合的技术难度,提高了光纤耦合工艺的容差和环境稳定性。采用异构集成微波光子探测器芯片,简化了探测器模块的电路设计,解决探测器模块光学特性与微波特性兼顾的难题,提高了可生产性。

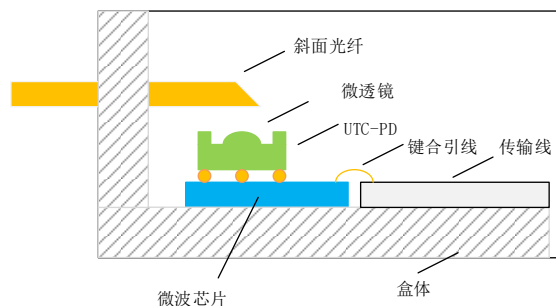


图8 微波光子探测器模块封装图

Fig. 8 Photoreceiver module package diagram

3 电路制备与分析

基于InP基光电芯片工艺平台成功制备了单行载流子光电二极管(UTC-PD)芯片,其尺寸为 $0.34\text{ mm}\times 0.34\text{ mm}\times 0.15\text{ mm}$ 。采用精细的刻蚀工艺在芯片背面实现光滑表面的圆形微透镜,该透镜拥有 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的曲率半径、 $90\text{ }\mu\text{m}$ 的表面直径以及 $12\text{ }\mu\text{m}$ 的拱形高度。微透镜刻蚀面平滑,无任何聚合物残留,底部呈现出完美的规则圆形形状。

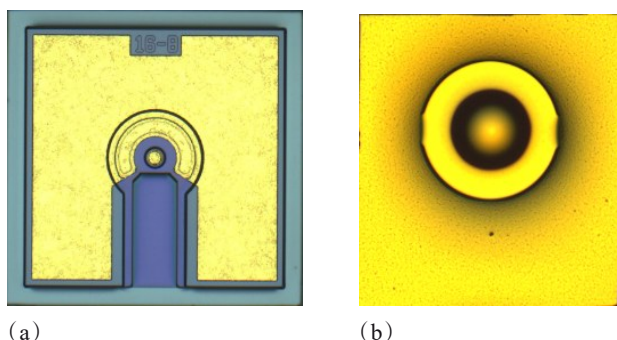


图9 (a)UTC-PD芯片正面照片;(b)芯片背面照片

Fig. 9 Picture of the UTC-PD front face (a) and bottom face (b)

基于芯片三维异构集成技术,将UTC-PD芯片倒装(Flip-chip)到微波集成电路芯片上,实现了异构集成微波光子探测器芯片。

采用光波元件分析仪对探测器芯片的光学特性和微波特性进行测试。通过光纤探针实现光信号的耦合输入,采用微波GSG探针实现微波信号的连接。测试结果表明研制的微波光子探测器芯片具有出色的性能指标:光学响应度优于 0.85 A/W ,暗电流小于 50 nA ,偏振相关损耗低于 0.1 dB , 1 dB 带宽超过 42 GHz ,端口回波损耗优于 11 dB 。基于光电混合封装工艺,研制的小型化微波光子探测器

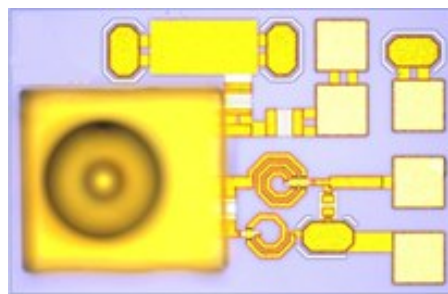


图10 微波光子探测器芯片

Fig. 10 Picture of the photoreceiver

模块,其尺寸仅为 $12.7\text{ mm}\times 17.8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 。该探测器模块在 0.8 A/W 的响应度时,饱和输入光功率达到 120 mw 。

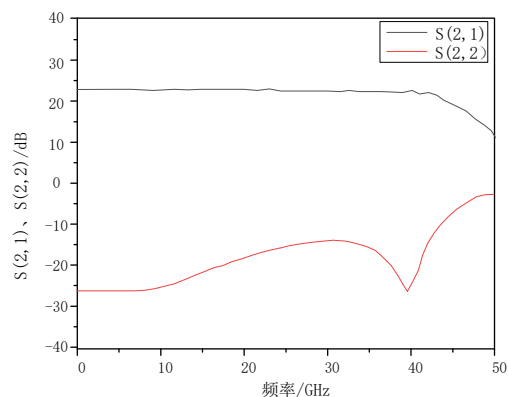


图11 探测器芯片频率响应

Fig. 11 Experiment frequency response of the photoreceiver

4 结果与讨论

本文优化UTC-PD的外延层厚度和掺杂浓度,改进了外延结构,显著提升了光功率能力及响应速度;采用金属反射层、背入射一体化集成微透镜设计,增强了光电二极管的响应度;采用频率高阶加权优化等效模型的准确度,并通过宽带匹配电路的设计,优化探测器的频率响应特性;利用金锡合金微凸点代替键合金丝引线,大幅度降低了互联引线的高频寄生影响,扩展微波光子探测器的工作频率;同时,采用高导热率的衬底和金锡合金微凸点技术,有效提升了探测器芯片的热导率。通过UTC-PD与微波集成电路的三维异构集成技术,研发了一款高功率、宽带异构集成微波光子探测器芯片,该芯片展现了超过 42 GHz 的 1 dB 宽带性能、 0.85 A/W 的高响应度,以及超过 120 mw 的饱和输入光功率。本研究所采用的三维异构集成技术充分发挥了InP光电器件和微波集成电路的材料及工

艺平台优势,促进了微波光子器件向高功率、高性能、多功能集成化的发展,为微波光子器件的工程化应用提供了新的途径。

References

- [1] Li Ming, Hao Tengfei, Pan Shilong, et al. Frontiers and prospects of integrated microwave photonics (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 32–35. (李明, 郝腾飞, 潘时龙, 等. 微波光子集成及前沿展望[J]. 红外与激光工程), 2021, 50(7): 32–45.
- [2] Xiong Bing, Chao Enfei, Luo Yi, et al. Research on ultra-wideband and high saturation power uni-traveling carrier photodetectors (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 64–69. (熊兵, 晁恩飞, 罗毅, 等. 超宽带高饱和单行载流子光探测器研究 [J]. 红外与激光工程), 2021, 50(7): 64–69.
- [3] Umezawa, Toshimasa. High-speed photoreceiver and its related technology [C]. *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, 2014: 780–784.
- [4] S. Fedderwitz, C. Leonhardt, J. Honecker, et al. A high linear and high power photoreceiver suitable for analog applications [C]. *IEEE Photonics Conference*, 2012: 308–309.
- [5] C. Coleman, G. Lee, T. Low, et al. High Output Power Millimeter Wave GaAsSb-InP UTC Photoreceiver MMICs [C]. *IEEE Photonics Conference*, 2018: 1–2.
- [6] X. Li, N. Li, S. Demiguel, et al. A comparison of front-and backside-illuminated high-saturation power partially depleted absorber photodetectors [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(9): 1321–1325.
- [7] T. Umezawa, A. Kanno, A. Matsumoto, et al. +16 dBm High Power and High Linearity Integrated Photoreceiver for W-band Fiber Wireless Communication Applications [C]. *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2019: 1–2.
- [8] T. Umezawa, P. T. Dat, K. Kashima, et al. 100-GHz radio and power over fiber transmission through multicore fiber using optical-to-radio converter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 36(2): 617–623.
- [9] Y. Chen, and B. Chen. High Speed and High Power Photodiode with 50 GHz Bandwidth [C]. *International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, 2019: 1–3.
- [10] N. R. Das, and M. J. Deen. On the performance analysis and design of an integrated front-end PIN/HBT photoreceiver [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(1): 78–91.
- [11] Zhilei Fu, Hui Yu, Zhujun Wei, et al. High-Power and High-Speed Ge/Si Traveling-Wave Photodetector Optimized by Genetic Algorithm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(1): 240–248.