

面向微波光子应用的高一致性光电探测器阵列研究

陈代尧,周鹏,王栋,卢朝保,黎洪迪

(成都嘉纳海威科技有限责任公司,成都 610041)

摘要:针对微波光子系统对集成功率合成器的光电探测器阵列的实用化需求,设计了一种基于光电混合集成封装技术的高一致性光电探测器阵列。该方法从光路设计、射频链路设计和封装结构设计3个维度展开,通过对光纤长度公差进行精确控制,并对低噪声放大器、均衡器等射频芯片的增益与相位进行筛选匹配,以提升通道间一致性。实验结果表明:该阵列工作频率为2~18 GHz,单通道增益大于-13.7 dB,通道增益一致性为 ± 0.3 dB,相位一致性优于 $\pm 13.82^\circ$,扣除光纤长度差异后电相位一致性优于 $\pm 2.75^\circ$ 。基于实测数据的功率合成仿真显示,合成后增益大于-7.6 dB,相对功率合成效率达97.5%以上,扣除光纤长度差异后平均效率达99.83%。

关键词:微波光子;光电探测器阵列;功率合成;高一致性

中图分类号:TN256 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2026)02-0079-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.013

Research on high consistency photodetector array for microwave photonic applications

CHEN Daiyao, ZHOU Peng, WANG Dong, LU Chaobao, LI Hongdi

(Chengdu Ganide Technology Co., Ltd., Chengdu 610041)

Abstract: Aiming at the practical requirements of photodetector arrays with integrated power combiners for microwave photonic systems, a high-consistency photodetector array based on photoelectric hybrid integration packaging technology is designed. The proposed method is carried out from three dimensions: optical path design, radio frequency link design, and packaging structure design. Channel consistency is enhanced by precisely controlling the tolerance of fiber length and by screening and matching the gain and phase of radio frequency chips such as low-noise amplifiers and equalizers. Experimental results show that the array operates over a frequency range of 2~18 GHz. The single-channel gain is greater than -13.7 dB, with a channel gain consistency of ± 0.3 dB. The phase consistency is better than $\pm 13.82^\circ$, and after deducting the difference in fiber length, the electrical phase consistency is better than $\pm 2.75^\circ$. Power combination simulations based on measured data indicate that the combined gain is greater than -7.6 dB, with a relative power combination efficiency exceeding 97.5%. After compensating for fiber length differences, the average efficiency reaches 99.83%.

Key words: microwave photonic, photodetector array, power synthesis, high consistency

0 引言

模拟光链路因其高带宽、低损耗等特性对传输和处理微波信号极具吸引力^[1],典型应用包括天线远程处理^[2]、有线电视和光控相控阵雷达^[3]。高功率光电探

测器是模拟光链路中的核心器件,链路性能指标通常在高光电流工作条件下得到显著提升^[4]。将微波功率合成网络与光电探测器阵列进行集成,是提升输出光电流功率的有效技术途径^[5]。国内外研究机构对光电探测器阵列的功率合成技术进行了研究^[5-9]。Yang Fu等人^[5]采用威尔金森功率合路器将二元光电探测器芯片或四元光电探测器芯片单片集成,研制的集成芯片工作频率可达20 GHz。宁波大学的研究团队^[8-9]在研究光电探测器阵列功率合成原理的基础上,从理论上提出了L型行波探测器阵列、桥接T型二极管组功率合成阵列和桥接T型线性二极管级联阵列。然而,现

收稿日期:2025-03-03。

作者简介:陈代尧(1987—),男,工学硕士,工程师,主要研究方向为光电混合集成封装技术、光载无线传输技术与射频SIP封装技术。



陈代尧,周鹏,王栋,等:面向微波光子应用的高一致性光电探测器阵列研究

有研究大多集中于芯片级单片集成与功率合成理论分析,尚未见相关商业化封装器件的报道。

本文针对微波光子系统对集成功率合成器的光电探测器阵列的实用化需求,设计一种基于光电混合集成封装技术的高一致性光电探测器阵列。

1 器件设计与制备

本文设计的光电探测器阵列主要由光电探测器芯片、低噪声放大器芯片、均衡器芯片、功率合成器芯片、低压差线性稳压器、耦合光纤等组成,其原理框图如图1所示。4路光信号经耦合光纤到光电探测器芯片后转换为射频信号,再经射频放大、均衡与功率合成后输出。本文从光路设计与光纤长度控制、射频链路设计及封装结构设计3个方面,详细阐述光电探测器阵列的整体设计方案。

1.1 光路设计与光纤长度控制

光电探测器阵列中使用的探测器芯片为垂直光入射型单行载流子光电探测器芯片,其饱和输入光功率^[10]在13 dBm以上,光敏面位于探测器芯片的正上方。根据探测器芯片的特点,本文在光路上采用大斜面光纤直接耦合方案,通过光纤出光端面的全反射将水平方向的入射光转换为垂直方向^[11]。光纤出光端面的角度为42°,在保证耦合效率的同时可保持低光回波。光耦合时将响应度控制在0.56~0.58 A/W。

在功率合成中,输入射频信号的幅相一致性是决定其合成效率的关键因素^[12]。光电探测器阵列的相位差异来自光和电2个方面,其中,光引入的相位差异主要由光纤长度不一致导致。光相位差 $\Delta\theta$ 与光延时差 Δt 、光纤长度差 ΔL 的关系为

$$\Delta\theta = 360f\Delta t = 360fn \Delta L/c \quad (1)$$

式中: f 为射频信号频率, n 为光纤有效群折射率, c 为真空中光速。在1.55 μm 波长下, n 取值为1.468。

由式(1)可知,光相位差与信号频率和光纤长度差成正比。对于18 GHz的射频信号,当光纤长度差为1 mm时,根据式(1)计算得到光延时差为4.89 ps、相位

差为31.71°。该相位差将直接影响功率合成效率,在此情况下,合成效率约为92.4%。采用矢量网络分析仪相位测量技术^[13]对耦合光纤进行筛选,将光纤长度公差控制在 ± 0.5 mm以内。

1.2 射频链路设计

射频链路包括电/光与光/电转换链路、低噪声放大器、均衡器及功率合成器。电/光与光/电转换链路为负增益,功率合成器在18 GHz处的额外插入损耗约为1.8 dB,为保证整个射频链路在2~18 GHz时的增益,本文采用增益为15 dB的低噪声放大器来进行补偿。在功率合成前,本文用插入损耗为0.6 dB的均衡器对各个通道的增益曲线进行平坦化。

首先,功率合成网络采用两级结构,由3个功率合成器芯片构成。该芯片的2个输入端口分设于左右两侧,便于射频走线的等长设计。其次,为提升有源器件的一致性,对低噪声放大器、均衡器及功率合成器进行了在片测试筛选。其中,低噪声放大器的增益和相位一致性被严格控制在 ± 0.2 dB和 $\pm 2^\circ$ 以内;而作为无源器件的均衡器与功率合成器,其筛选标准更高,增益和相位一致性分别控制在 ± 0.05 dB和 $\pm 0.5^\circ$ 以内。最后,在传输线设计方面,将4个通道的微带线均集成于一体化电路片上。通过将射频芯片嵌入电路片的挖孔区域内,使芯片与微带线处于同一平面,可以缩短压焊金丝长度,改善高频响应。同时,采用一体化电路片使得芯片的相对位置固定,保证各通道电长度的一致性,进而确保了信号的电相位一致性。

1.3 封装结构设计

光电探测器阵列的管壳选用与芯片热膨胀系数相匹配的可伐合金材料,采用数控加工整体成型,表面镀镍镀金。为避免功率合成前光和射频在4个通道之间的串扰,在管壳内部用金属墙进行隔离。外盖板材料为可伐合金,采用平行缝焊工艺进行密封,以保证内部芯片长期工作可靠性。馈电绝缘子与超小型插拔式微型(SMPM)射频连接器采用金锡焊料高温焊接,并在焊接完成后进行管壳检漏,确认焊接的气密

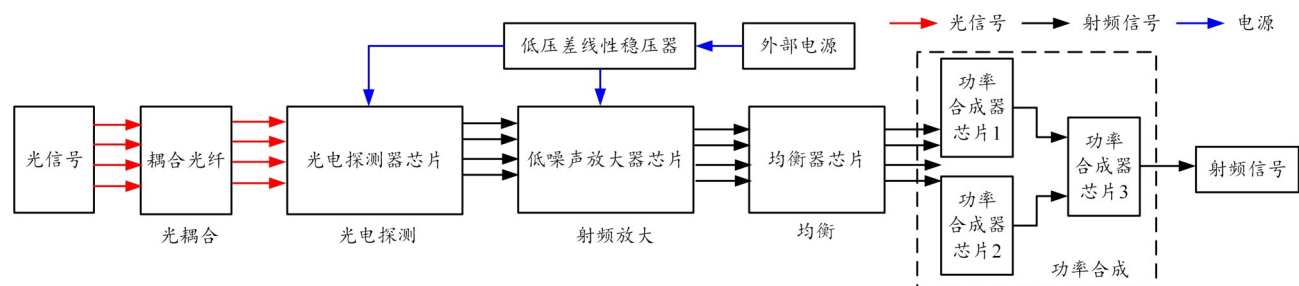


图1 光电探测器阵列原理框图

性。光纤耦合后用铅锡焊料焊接固定在腔体上,既保证耦合的可靠性也保证焊接处良好的密封性。

本文设计的基于光电混合集成封装技术的四通道(CH₁~CH₄)光电探测器阵列实物图如图2所示。4路光信号由8°斜面物理接触光纤连接器(FC/APC光纤连接器)输入,功率合成后的射频信号由SMPM射频连接器单路输出。器件外形尺寸长×宽×高为35.6 mm×35 mm×7 mm(不含安装法兰与尾纤)。



图2 光电探测器阵列实物图

2 器件性能测试与功率合成仿真

为表征光电探测器阵列的性能,本文搭建了测试系统如图3所示。测试系统中,1 550 nm光源采用中国电科44所研制的高功率激光器组件,其输出光功率为16 dBm。电光调制器采用中国电科34所研制的20 GHz电光调制器组件,其半波电压约为5 V(在1 kHz调制条件下),正交偏置工作点的插入损耗低于7 dB。1 550 nm光源输出的偏振光输入电光调制器;矢量网络分析仪输出的射频信号加载到电光调制器上;从电光调制器输出的调制光经光纤放大器放大输出,输出的平均光功率约为20 dBm;光衰减器用来调节输入到待测光电探测器阵列的光功率;直流电源给被测件提供+5.5 V电源;被测件输出的射频信号输入矢量网络分析仪进行增益和相位的测量。

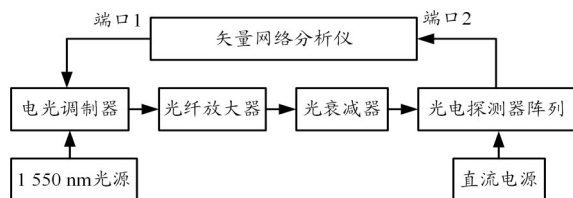


图3 测试系统框图

受测试条件限制,本文仅对器件的单通道性能进行测试,即光从器件的某一通道输入,然后利用矢量网络分析仪测得的散射参数(S参数)进行功率合成仿

真。测试条件:频率范围为2~18 GHz;输入电光调制器的射频信号功率为0 dBm;输入光电探测器阵列的平均光功率为10 dBm。

2.1 单通道测试

光电探测器阵列的增益响应曲线如图4所示。可以看出,各个通道在2~18 GHz频率内的增益均在-13.7 dB以上,带内平坦度约为±1.0 dB;4个通道增益变化趋势一致,通道增益一致性为±0.3 dB。

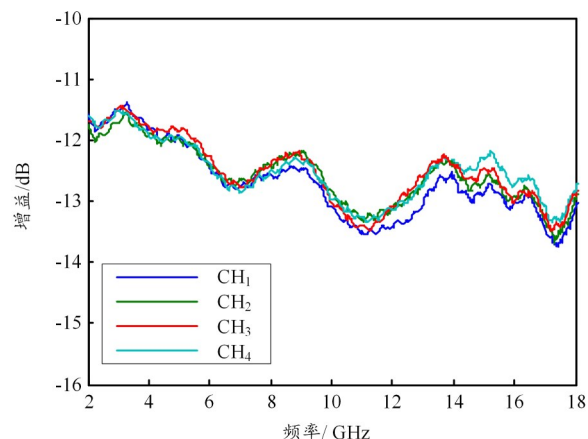


图4 增益响应曲线图

将矢量网络分析仪测得的相位数据以CH₃为参考进行归一化处理,得到各通道相对于CH₃的相位差(记为CH₁/CH₃、CH₂/CH₃、CH₄/CH₃)曲线图如图5所示。图中实线为其它通道相对CH₃的相位差,其最大相位差分别为-7.93°、-13.82°和9.48°。结果表明,该光电探测器阵列的通道相位一致性优于±13.82°。图中所示的相位差由光相位差与电相位差共同构成。由于光相位差与频率成正比,因此各通道的相位差在理论上应呈现为一条直线,该直线的斜率与光延时差及光纤长度差呈线性关系。为提取这一关系,对各条曲线进行了线性拟合,结果如图5中虚线所示。拟合得到的

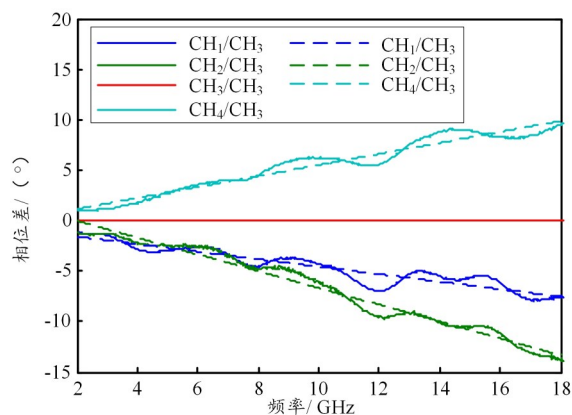


图5 相位差曲线图

陈代尧,周鹏,王栋,等:面向微波光子应用的高一致性光电探测器阵列研究

斜率分别为 -0.37 、 -0.83 、 0.55 。由式(1)可知,线性拟合斜率 k 与光延时差 Δt 和光纤长度差 ΔL 的关系为

$$k = 360\Delta t = 360n \Delta L/c \quad (2)$$

根据式(2)计算得到其他通道相对 CH_3 的光延时差和光纤长度差如表1所示。可以看出, CH_2 相对 CH_3 的光延时差最大,最大值为 -2.31 ps,对应的光纤长度差为 -0.47 mm,在光纤长度公差 ± 0.50 mm范围内。

表1 相位差相关数据汇总表

| 通道/ 参考通道 | 最大 相位差/(°) | 线性 拟合斜率 | Δt /ps | ΔL /mm | 最大电相 位差/(°) |
|-------------|---------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| CH_1/CH_3 | -7.93 | -0.37 | -1.03 | -0.21 | -2.55 |
| CH_2/CH_3 | -13.82 | -0.83 | -2.31 | -0.47 | 1.26 |
| CH_4/CH_3 | 9.48 | 0.55 | 1.52 | 0.31 | 2.75 |

为消除光纤长度差异引入的光相位差,首先在 CH_1 、 CH_2 和 CH_4 中分别加入 -1.03 、 -2.31 、 1.52 ps的延时进行补偿。然后,根据式(1)计算出该延时量对应的光相位差,并将其从图5中的总相位差中减去,得到仅由电路引入的电相位差曲线,如图6所示。结果表明,补偿后的最大电相位差分别为 -2.55° 、 1.26° 和 2.75° ,即该光电探测器阵列的通道电相位一致性优于 $\pm 2.75^\circ$ 。

2.2 功率合成仿真

基于先进设计系统(ADS)软件,利用实测S参数进行功率合成仿真,原理框图如图7所示。该仿真原理图由功率分配网络、实测数据模块、延时补偿单元、功率合成网络以及输入/输出 50Ω 负载等部分构成。

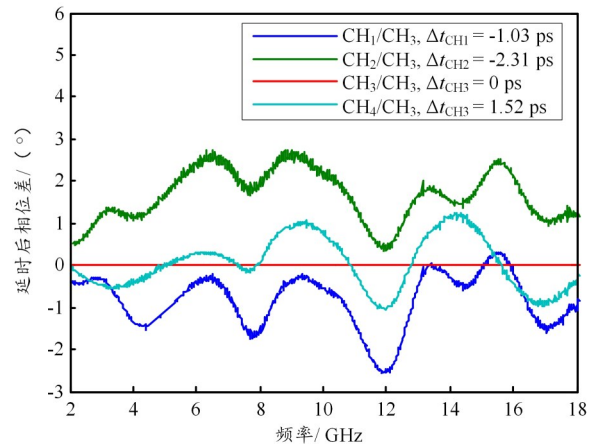


图6 延时后相位差曲线图

其中,实测数据采用矢量网络分析仪测得的S参数,图中 $CH_1 \sim CH_4$ 代表4个通道的实测S参数;延时补偿单元用于调整各通道相位,以消除光纤长度差异。功率分配网络与功率合成网络均由3个理想功分器级联而成。为确保仿真链路的增益平衡,将功率分配网络的第一级功分器(图中红色虚线框内)设置为 1.414 (对应 3 dB增益),使得经过第二级功分器后总增益为 0 dB;其余功分器均设置为 0.707 (理想 3 dB功分器)。

功率合成后的增益响应曲线如图8所示。图中,红线为直接功率合成的仿真结果,蓝线为消除光纤长度差异后的仿真结果。由图可知,功率合成后的增益在 -7.6 dB以上,带内平坦度约为 ± 1.0 dB。光纤长度差异导致合成增益略有下降,在 18 GHz处下降最为明显,约为 0.1 dB。基于上述增益数据,将合成后增益与

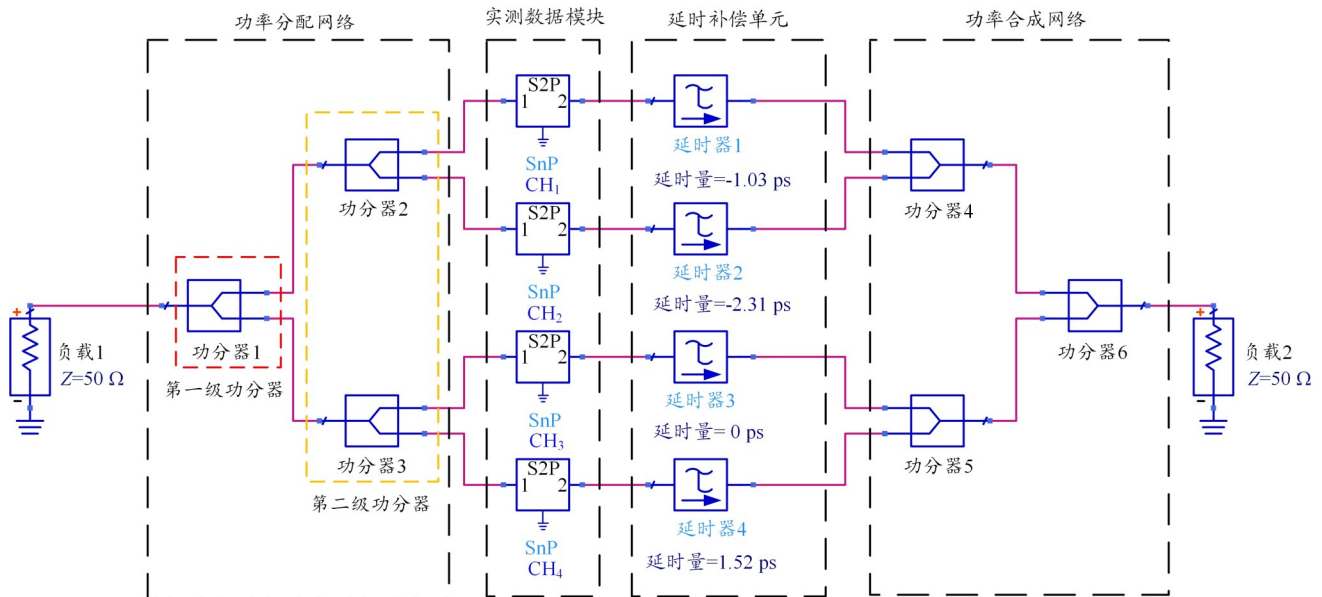


图7 功率合成仿真原理图

各通道增益之和相除,得到相对功率合成效率曲线,如图9所示。结果表明,光电探测器阵列直接功率合成的相对效率可达97.5%以上;在扣除各通道光纤长度差异后,其平均相对功率合成效率提升至99.83%。

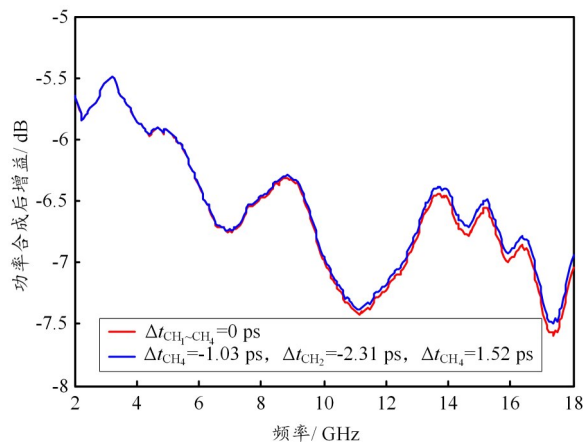


图8 功率合成后增益响应曲线图

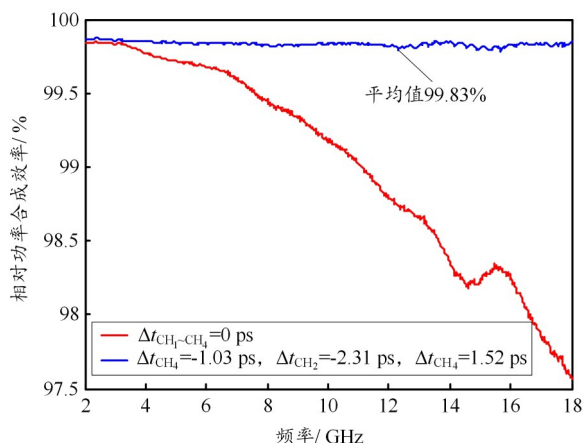


图9 相对功率合成效率曲线图

3 结束语

本文研制了一种基于光电混合集成封装技术的高一致性光电探测器阵列。通过在光路、射频链路及结构方面的设计,以及对光纤长度公差和射频芯片增益与相位的控制,实现了高增益一致性和高相位一致性。研制的光电探测器阵列经单通道性能测试,工作频率范围覆盖2~18 GHz,各个通道的增益大于-13.7 dB,带内增益平坦度约为 ± 1.0 dB,通道增益一致性为 ± 0.3 dB,通道相位一致性优于 $\pm 13.82^\circ$,通道电相位一致性优于

$\pm 2.75^\circ$ 。采用单通道测试数据进行功率合成仿真,功率合成后增益大于-7.6 dB,带内增益平坦度约为 ± 1.0 dB。与各通道增益之和作对比,直接功率合成时的相对功率合成效率大于97.5%,扣除光纤长度差异后的相对功率合成效率平均值为99.83%。下一步将提升光纤长度公差的控制精度,以进一步提高通道相位一致性。

参考文献:

- [1] Seed A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [2] Novak D. Enabling microwave photonic technologies for antenna remoting[J]. IEEE LEOS Newsletter, 2009, 23(1): 21-24.
- [3] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [4] Peng Yiwei, Sun Keye, Shen Yang, et al. High-gain ka-band analog photonic link using high-power photodiode at 1064 nm[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(6): 1724-1732.
- [5] YANG Fu, Pan Huapu, Campbell J C. Photodiodes with monolithically integrated wilkinson power combiner[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(4): 541-545.
- [6] Yang Fu, Pan Huapu, Li Zhi, et al. High linearity photodiode array with monolithically integrated Wilkinson power combiner[C]//2010 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, October 5-9, 2010, Montreal, Canada. New York: IEEE, 2010: 111-113.
- [7] Urick V J, Hastings A S, McKinney J D, et al. Photodiode linearity requirements for radio-frequency photonics and demonstration of increased performance using photodiode arrays[C]//2008 International Topical Meeting on Microwave Photonics Jointly Held with the 2008 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, September 9-October 3, 2008, Gold Coast, Australia. New York: IEEE, 2008: 86-89.
- [8] 王红华,文化锋,武晴涛,等. L型阵列探测器合成功率研究与设计[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(12): 13-18.
- [9] 徐梦洁. 基于功率合成技术的高功率大带宽光电探测器原理研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2019.
- [10] 王栋,陈代尧,卢朝保,等. 小型化高隔离度平衡光电探测器阵列研究[J]. 光通信技术, 2024, 48(5): 97-101.
- [11] 朱云柯,陈少勇,吕晓萌,等. 一种超紧凑封装的光/电转换阵列模块[J]. 光通信技术, 2023, 47(6): 61-65.
- [12] 曾凡剑,孙列鹏,施龙波,等. 增益和相位一致性对功率合成效率的影响[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(5): 10-13.
- [13] 朱兴邦,孙权社,郑祥亮,等. 基于调制相移法的高准确度光纤长度测量技术[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 73-77.