

小型化高隔离度平衡光电探测器阵列研究

王栋^{1,2},陈代尧^{1,2},卢朝保^{1,2},谭荣^{1,2},黄梦¹

(1.成都嘉纳海威科技有限责任公司,成都 610041;2.微波光子技术四川省重点实验室,成都 610029)

摘要:针对传统微波光子应用平衡光电探测器体积大、集成度低的问题,设计了一种基于光电混合集成封装技术的小型化、高隔离度平衡光电探测器阵列,通过集成多个平衡光电二极管芯片及其偏置与匹配电路,实现了4个独立通道的平衡光电探测功能,每个通道平均体积仅为588 mm³。此外,搭建了测试系统,对平衡光电探测器阵列的性能进行测试。测试结果表明:该平衡光电探测器阵列各个通道的响应度大于0.9 A/W,3 dB带宽约为12 GHz,带宽范围内的通道一致性优于±0.43 dB,共模抑制比大于30 dB,通道隔离度在50 dBc以上,在10 GHz处的饱和输入光功率大于8.4 dBm。

关键词:微波光子;平衡光电探测器阵列;小型化;高隔离度;光电混合集成

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)05-0097-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on miniaturized high-isolation balanced photodetector array

WANG Dong^{1,2}, CHEN Daiyao^{1,2}, LU Chaobao^{1,2}, TAN Rong^{1,2}, HUANG Meng¹

(1. Chengdu Ganide Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Microwave Photonics, Chengdu 610029, China)

Abstract: Aiming at the problems of large volume and low integration of conventional balanced photodetectors for microwave photonics applications, a miniaturized, high-isolation balanced photodetector array based on hybrid photoelectric package technology is designed. By integrating multiple balanced photodiode chips and their bias and matching circuits, the balanced photodetector function of 4 independent channels is realized. The average volume of each channel is only 588 mm³. In addition, a test system is set up to test the performance of the balanced photodetector array. The test results show that the response of each channel of the balanced photodetector array is greater than 0.9 A/W, the bandwidth of 3 dB is about 12 GHz, the channel consistency in the bandwidth range is better than ±0.43 dB, the common mode rejection ratio is greater than 30 dB, the channel isolation is greater than 50 dBc, and the saturated input optical power at 10 GHz is greater than 8.4 dBm.

Key words: microwave photonics, balanced photodetector array, miniaturization, high-isolation, optoelectronic hybrid integration

0 引言

平衡光电探测技术凭借其抑制共模噪声的特性,能够有效消除本征激光器的相对强度噪声及二极管

自身噪声,进而显著提升信噪比,因此在空间激光通信^[1-2]、光纤通信^[3]、相干激光雷达^[4]、光学相干层析成像^[5]及量子信息^[6-8]等领域得到了广泛应用。

在微波光子系统中,平衡光电探测器通过抑制激光器的相对强度噪声和掺铒光纤放大器中的自发辐射噪声来降低系统噪声。在高性能的微波光子传输链路中,高速高功率平衡光电探测器至关重要^[9]。目前,针对微波光子应用的平衡光电探测器的研究主要集中在提高探测器芯片的性能方面^[10-11]。国内外仅有少量公司拥有成熟的单通道平衡光电探测器产品,虽然产品的部分性能指标优异,但存在体积大、集成度低的问题。以美国 Coherent 公司为例,该公司生产的单

收稿日期:2024-06-25。

基金项目:微波光子技术四川省重点实验室基金项目(WMP2023-00)资助。

作者简介:王栋(1982—),男,湖北荆门市人,工学博士,研究员级高工,主要研究方向为高密度光电混合集成技术、光载无线传输技术与射频 SIP 封装技术。曾荣获省部级科技进步二等奖1项。



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

通道平衡光电探测器具有高达 100 GHz 的 3 dB 带宽,但其尺寸较大,为 20.3 mm×21.45 mm 8.63 mm,计算得出的体积约为 3 758 mm³。

为此,本文设计一种基于光电混合集成封装技术的小型化、高隔离度平衡光电探测器阵列,以减小产品体积,提高集成度。

1 平衡光电探测器阵列关键参数

平衡光电探测器的基本参数包括暗电流、响应度、3dB 带宽、饱和输入光功率以及共模抑制比(CMRR)等^[12]。在平衡光电探测器阵列的应用场景中,通道隔离度和通道一致性是评估其性能的关键指标。本文深入研究平衡光电探测器几个关键参数,以优化其性能。

1.1 饱和输入光功率

饱和输入光功率是衡量光电探测器线性度的关键参数。通常情况下,光电探测器的输出射频功率会随着输入光功率的增加而线性增长,直至输出射频功率偏离线性响应。当输出射频功率与输入光功率之间的关系偏离线性变化曲线 1 dB 时,所对应的平均输入光功率即定义为饱和输入光功率。

1.2 CMRR

CMRR 是表征平衡光电探测器对共模信号抑制能力的关键参数。由于平衡光电探测器中 2 个光电二极管(PD)在频率响应上对调制光信号存在差异,导致 CMRR 成为频率的函数。通常以 dB 为单位来表示 CMRR 的值,其定义为

$$R_{\text{CMRR}} = 20 \times \lg \left| \frac{S_{21_PD+} - S_{21_PD-}}{S_{21_PD+} + S_{21_PD-}} \right| \quad (1)$$

其中, S_{21_PD+} 和 S_{21_PD-} 分别为调制光信号入射到加正电 PD 与加负电 PD 上时平衡光电探测器的频率响应。通过矢量网络分析仪可分别测量 S_{21_PD+} 和 S_{21_PD-} ,并根据式(1)计算出平衡光电探测器的 CMRR。

1.3 通道隔离度

对于光电探测器阵列,通道之间可能会出现串扰现象。通道隔离度是用来量化光电探测器阵列中各通道间串扰程度的一个物理量,其数值越小,说明通道间的串扰越少。当调制光从某一通道输入时,测试该通道的频率响应 S_{21_opt} ,同时测试其它通道(无调制光输入)的频率响应 S_{21_other} ,以 dBc 为单位定义的通道隔离度为

$$I_{\text{ISO}} = 20 \times \lg(S_{21_opt} / S_{21_other}) \quad (2)$$

1.4 通道一致性

由于光电探测器阵列中各个通道在响应度、频率

响应等方面存在差异,这导致了各个通道的增益曲线不尽相同。这种增益曲线的一致性问题可通过通道一致性这一参数来进行量化。以 dB 为单位的通道一致性定义为

$$\Delta S_{21} = \pm (S_{21_MAX} - S_{21_MIN}) / 2 \quad (3)$$

其中, S_{21_MAX} 和 S_{21_MIN} 分别为各个通道对应频点处增益的最大值与最小值。

2 器件设计与制备

平衡光电探测器阵列包含 4 个平衡探测器通道(CH₁~CH₄),主要由平衡 PD 芯片、电阻、电容、金属化斜面双光纤、多光纤插拔式(MPO)光连接器、超小型插拔式(SMPM)射频连接器及金属密封腔体组成,其原理框图如图 1 所示。图中,+5 V 与-5 V 电源分别为 PD+和 PD-供电, R 与 C 为偏置电路的电阻与电容, R_L 为匹配电阻, RF_{out} 为通道的射频输出。

为了确保平衡光电探测器阵列的射频性能和可靠性,对其光路、射频电路以及结构进行设计时,本文考虑了以下几点:

1)平衡 PD 芯片由同一晶圆上相邻的 2 个间距为

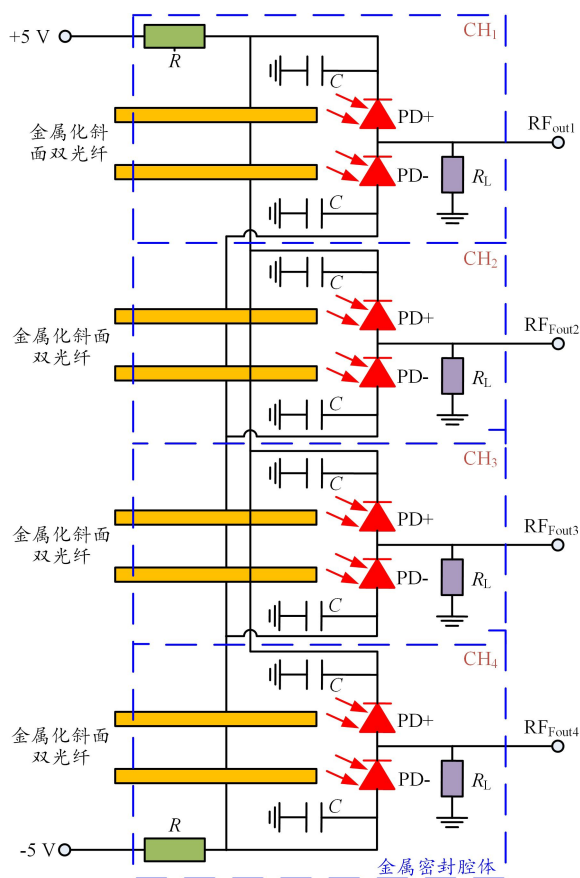


图1 平衡光电探测器阵列原理框图

250 μm 的 PD 芯片构成,在划片时将 2 个芯片划成一个整体,可有效地避免由于贴片位置误差而导致的耦合响应度不一致的问题。此外,还需对 PD 芯片的关键参数(包括响应度、电容、暗电流、击穿电压和正向压降)进行测试,以确保通道内的正负探测器之间具有良好的频率响应一致性。

2)射频通道上的电连接通过使用自动金丝球焊键合机来完成,这样可以保持通道内部和不同通道之间金丝长度的一致性,从而确保频率响应的一致性。

3)光耦合采用中心间距为 250 μm 的金属化斜面双光纤,它们与平衡 PD 芯片的中心间距相匹配,从而确保耦合过程中的响应度一致性。光纤的固定则采用了铅锡焊接工艺,既能保证耦合的可靠性也能维持良好的气密性。

4)平衡光电探测器阵列的通道间距仅为 5 mm,为最大限度地降低通道间串扰,在各个通道之间采用金属墙进行隔离,以提高通道间的隔离度。

5)壳体材料选用与 PD 芯片热膨胀系数相匹配的可伐合金,并通过平行缝焊工艺实现气密性封装,以此隔绝外界环境对内部芯片的影响,确保器件长期工作的可靠性。

本文设计的基于光电混集成封装技术的平衡光电探测器阵列实物图如图 2 所示。光由 12 芯 MPO 连接器输入(仅使用其中 8 路),射频信号由 SMPM 射频连接器输出。器件外形尺寸为 28 mm $\times$ 14 mm $\times$ 6 mm,体积为 2 352 mm³,每个通道的平均体积仅为 588 mm³。相比于美国 Coherent 分立器件的方案,本文设计的平衡光电探测器阵列的单通道体积仅为 15.6%,小型化优势明显。

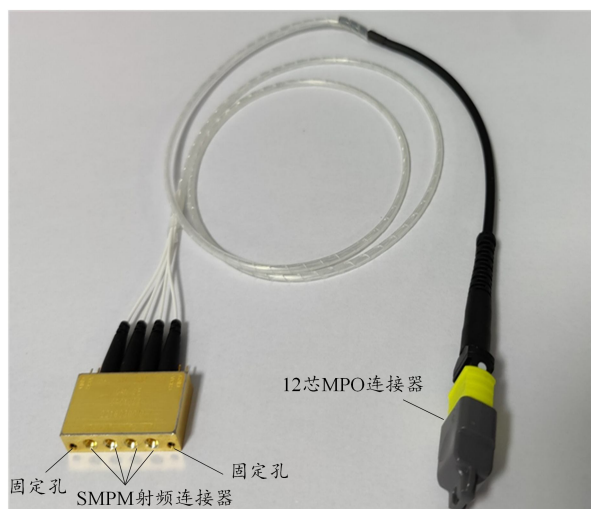


图 2 平衡光电探测器阵列实物图

3 器件性能测试

平衡光电探测器阵列的性能测试系统框图如图 3 所示。测试系统由矢量网络分析仪、调制光源、光纤放大器、光衰减器、直流电源组成。图中,黑线表示射频信号连线,红线表示光纤连接,蓝线表示电源连线。测试条件如下:频率为 100 MHz~16 GHz,输入调制光源的射频信号功率为 0 dBm,平衡光电探测器阵列输入光功率也为 0 dBm。

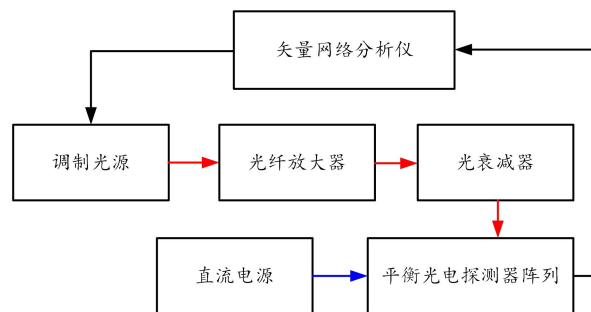


图 3 测试系统框图

平衡光电探测器阵列的增益响应曲线图如图 4 所示。可以看出,各个通道的 3 dB 带宽大致在 12 GHz 左右,通道之间保持了良好的一致性。根据式(3)计算的通道一致性结果如图 5 所示。可以看出,在 12 GHz 频率范围内,通道一致性优于 ± 0.43 dB。根据式(1)计算各个通道的 CMRR 结果如图 6 所示。可以看出,在 8 GHz 及以下频率时,各通道的 CMRR 均高于 35 dB;而在 12 GHz 时,各通道的 CMRR 则大于 30 dB。

响应度、通道隔离度和饱和输入光功率测试结果如表 1 所示。可以看出,各个通道的响应度均在 0.90 A/W 以上,响应度差异仅为 0.14 dB,这表明金属

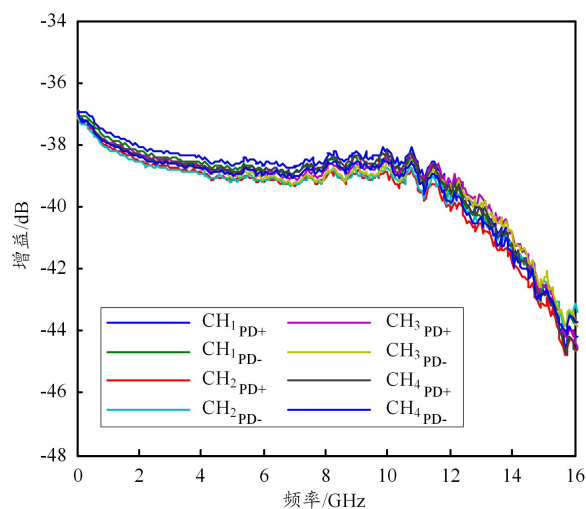


图 4 增益响应曲线图

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

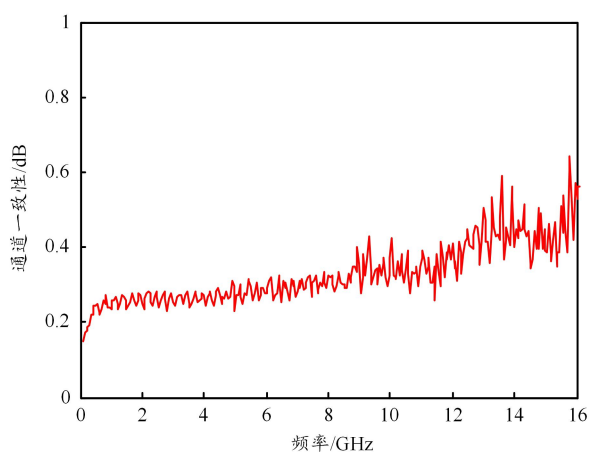


图5 通道一致性曲线图

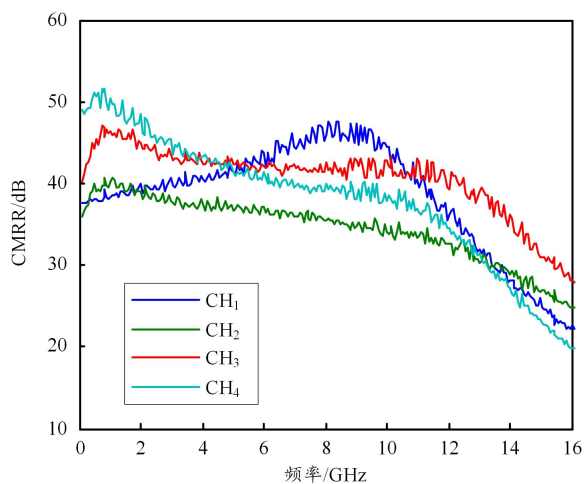


图6 CMRR 曲线图

化斜面双光纤与平衡 PD 芯片实现了高耦合效率和一致的响应度;12 GHz 频率内的通道隔离度均在 50 dBc 以上,说明器件中的金属隔离墙达到了良好的防串扰效果;各个通道在 10 GHz 频率处的饱和输入光功率在 8.4 dBm 以上,同一通道内 PD+与 PD-的饱和输入光功率差值最大为 0.3 dB,表明 PD 芯片具有良好的一致性。典型的通道隔离度曲线图如图 7 所示,以光从通道 1 的 PD+输入时测得的增益曲线为基准,图中曲线为通道 2 至通道 4 的增益曲线相对于基准的归一化结果。典型的输出射频功率随输入光功率变化曲线图如图 8 所示。可以看出,随着输入光功率的增加,输出射频功率先线性增加而后达到饱和;随着射频信号的频率的增加,饱和输入光功率也有所下降。图中虚线为对应频点的输出射频功率随输入光功率线性变化的拟合线,偏离该线性拟合线 1 dB 处对应的输入功率即为饱和输入光功率。

表 1 响应度、通道隔离度及饱和输入光功率测试结果

通道	响应度 /(A/W)	通道隔离度 /dBc	饱和输入 光功率 /dBm@10 GHz
CH ₁	PD+	0.90	51.62
	PD-	0.91	52.78
CH ₂	PD+	0.93	51.40
	PD-	0.91	50.64
CH ₃	PD+	0.90	52.23
	PD-	0.90	52.57
CH ₄	PD+	0.92	52.06
	PD-	0.92	52.23

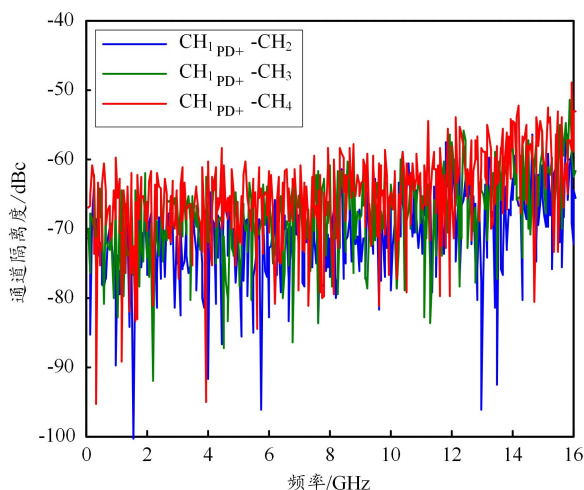


图7 通道隔离度曲线图

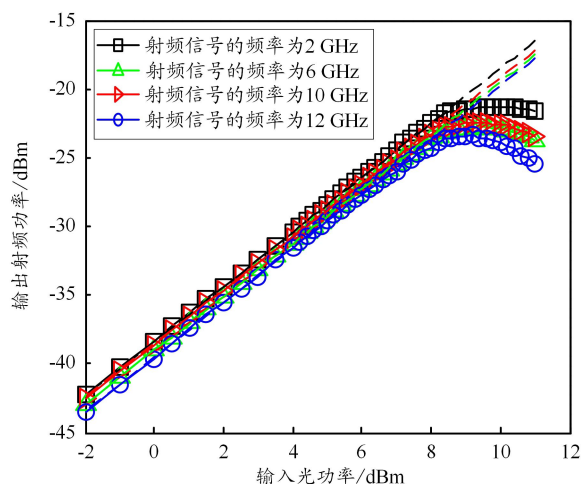


图8 输出射频功率随输入光功率变化曲线图

4 结束语

本文设计了一种基于光电混合集成封装技术的小型化高隔离度平衡光电探测器阵列。通过光路、射频电路及结构方面的设计,在 28 mm×14 mm×6 mm 的尺寸内实现了通道间距仅为 5 mm 的 4 通道平衡光电探测器,单通道体积仅为美国 Coherent 公司方案器件的 15.6%。对制备样品的测试结果表明:各个通道的响应度大于 0.9 A/W, 3 dB 带宽约 12 GHz, 带宽范围内的通道一致性优于±0.43 dB、CMRR 大于 30 dB、通道隔离度在 50 dBc 以上,在 10 GHz 处的饱和输入光功率大于 8.4 dBm。下一步将提升平衡 PD 芯片的带宽和饱和输入光功率,以满足 Ku 波段微波光子链路对平衡光电探测器阵列的需求。

参考文献:

- [1] GUIFANG L. Recent advances in coherent optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009(1): 279–307.
- [2] 崔大健,周浪,奚水清,等. 星载高灵敏度平衡光电探测器研究[J]. *半导体光电*, 2020, 41(4): 480–484.
- [3] KIKUCHI K. Fundamentals of coherent optical fiber communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 157–178.
- [4] WANG R, CHEN L, ZHAO Y M, et al. A high signal-to-noise ratio balanced detector system for 2 μ m coherent wind lidar[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(7): 073101-1–073101-9.
- [5] FERCHER A F, DREXLER W, HITZENBERGER C K, et al. Optical coherence tomography-principles and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2003, 66(2): 239–303.
- [6] LAWRIE B J, LETT P D, MARINO A M, et al. Quantum sensing with squeezed light[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(6): 1307–1318.
- [7] BOURASSA J E, ALEXANDER R N, VASMER M, et al. Blueprint for a scalable photonic fault-tolerant quantum computer[J]. *Quantum*, 2021, 5: 392–424.
- [8] DRAHI D, WALK N, HOBAN M J, et al. Certified quantum random numbers from untrusted light[J]. *Physical Review X*, 2020, 10(4): 041048-1–041048-32.
- [9] 王紫贇,谢小军,魏超,等. 基于倒装键合的高速高功率平衡光电探测器[J]. *光学学报*, 2024, 44(13): 1304001-1–10304001-8.
- [10] ZHOU G, RUNGE P, KEYVANINIA S, et al. High-power InP-based waveguide integrated modified uni-traveling-carrier photodiodes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(4): 717–721.
- [11] HULME J, KENNEDY M, CHAO R L, et al. Fully integrated microwave frequency synthesizer on heterogeneous silicon-III/V[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2422–2431.
- [12] 王娇娇,赵泽平,刘建国. 光平衡探测器研究进展和发展趋势分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 100001-1–100001-10.