

基于封装集成的四通道微波光子电/光转换组件

蔡雪芳, 吕晓萌*, 廖翔, 伍艺龙, 景飞, 王超, 张童童, 许玮华, 赵炳旭, 龙敏慧

(中国电子科技集团公司 第二十九研究所, 成都 610029)

摘要: 在现有的微波光子系统中, 低成本、高性能和阵列化的电/光转换组件成为了限制微波光子应用的技术瓶颈之一。设计了一种基于光电混合封装技术的四通道直调电/光转换组件, 该组件集成了多种功能芯片, 实现了将四通道 2~18 GHz 的射频信号转换为光信号的功能。测试结果表明: 该组件实现了 18 GHz 的电光调制带宽、9 dB 的插入损耗、小于 30 dB 的噪声系数以及大于 10 dBm 的输入三阶截交点(IIP3); 在保证高性能电/光转换的同时, 有效缩减封装尺寸、降低系统重量和提高系统集成度, 有利于微波光子技术的阵列化应用。

关键词: 微波光子; 微波光子混合集成; 电/光转换; 高速直接调制

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)06-0032-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Four channel microwave photons electro-optical conversion module based on package integration

CAI Xuefang, LYU Xiaomeng*, LIAO Ao, WU Yilong, JING Fei,

WANG Chao, ZHANG Tongtong, XU Weihua, ZHAO Bingxu, LONG Minhui

(The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610029, China)

Abstract: In the existing microwave photons system, low-cost, high-performance and arrayed electro-optic conversion components become one of the technical bottlenecks that restrict the application of microwave photons. A four channel direct modulation electro-optic conversion module based on photoelectric hybrid packaging technology is designed. The module integrates a variety of functional chips and realizes the function of converting four channels of 2~18 GHz radio frequency signals into optical signals. The test results show that the module achieves 18 GHz electro-optic modulation bandwidth, 9 dB insertion loss, less than 30 dB noise coefficient and more than 10 dBm input third order intersection (IIP3). While ensuring high-performance electro-optical conversion, it can effectively reduce package size, reduce system weight and improve system integration, which is conducive to the array application of microwave photons technology.

Key words: microwave photons; microwave photons hybrid integrated; electro-optical conversion; high-speed direct modulation

0 引言

自 20 世纪 90 年代, 微波光子技术作为微波与光子技术相互融合交叉学科, 通过光子技术具备的损耗低、带宽大、重量轻、抗干扰和波分复用等优势, 有效地克服了“电子瓶颈问题”。微波光子技术是在光域上

实现微波信号处理的前沿光电子技术, 广泛应用于宽带无线接入网络、卫星通信、雷达以及电子对抗等系统中^[1-5]。2014 年, 美国海军实验室以“光子学照亮了雷达的未来”为题, 将微波光子学技术在雷达等中的工程应用提到了极为重要的高度^[6]。微波光子技术主要应用实例有光载射频^[7,8]、光学波束形成^[9,10]、光电振荡器^[11,12]和光子变频^[13]等。与传统微波技术相比, 微波光子技术具有独特的技术优势。

然而, 目前微波光子技术仍然是基于分立器件实现的, 导致整个系统在综合性能水平、体积、重量、功耗和成本等方面难以发挥其潜在优势。而发展高集成度的微波光子技术, 省略了单个器件和集成电路封装

收稿日期: 2019-11-26。

作者简介: 蔡雪芳(1971—), 女, 硕士, 高工。现工作于中国电子科技集团公司第二十九研究所, 研究方向为电磁场与微波技术。主要从事微波射频类、微波光子类专业领域的技术研究和产品开发; 业务领域涉及陆、海、空天等多种平台的产品研发工作, 相关技术成果得到广泛推广应用。

* 通信作者: 吕晓萌(E-mail: 342721062@qq.com)。



及互连所涉及材料和空间,可以最大限度地减少系统组件的体积、重量和功耗,从而提升系统集成度;同时,其避免引线互连带来的限制及不同器件和电路之间的匹配给系统设计造成的困扰,充分发挥其大带宽、全频段、灵活性和可重构能力的特点提高性能和可靠性,成为打破微波光子应用困局的关键手段^[14-18]。微波光子技术作为未来通信系统和雷达系统的关键技术,逐步由分立器件系统向芯片集成系统过渡发展。随着工艺技术的进步,微波光子的集成技术也得到了迅速发展,主要分为基于互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺技术的芯片集成(SOC)技术^[19-21]和基于多功能芯片微组装技术的混合集成封装(SIP)技术^[22-24]。其中,SOC技术采用平面半导体工艺,将光芯片和电芯片集成到同一材料体系中,实现工艺难度大、成品率低,难以短期内实现工程化。SIP技术主要采用金丝引线键合、透镜耦合等互连方式来实现不同芯片之间的低频信号、高频信号以及光信号的互连。与SOC技术相比,SIP技术具有成本低、设计灵活性高、制备工艺简单、可返修和易于工程化等优势,可迅速广泛地应用于通信和雷达系统中。

本文设计一种基于SIP工艺制备的四通道微波光子电/光转换组件,以实现将4路2~18 GHz的射频信号转换为光信号的功能。

1 电/光转换组件的设计原理

本文设计的微波光子电/光转换组件的单通道电路原理框图如图1所示。图中实线代表电信号路径,虚线代表光信号路径。该电路结构主要由微波部分、光学部分、温控部分和逻辑控制部分组成,射频端口和光学端口装配在结构体表面。

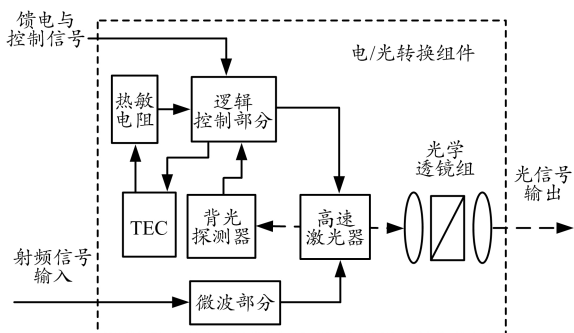


图1 电/光转换组件单通道电路原理框图

组件内部主要信号流向为:外界输入的射频信号通过射频端口输入到电/光转换组件内部,然后通过微波部分将输入的射频信号进行放大等微波处理后,通

过金丝键合方式加载到光学部分,光学部分将高速调制的射频信号加载到光学信号当中,并通过透镜组将调制的光信号耦合到输出光纤中输出。逻辑控制部分与微波部分、光学部分和温控部分分别通过金丝相连,实现对各部分工作状态的控制与状态上报。

各部分主要作用如下:

◆微波部分由均衡器、低噪声放大器等,主要功能是将外部输入的微波信号进行放大处理,并利用均衡器达到宽带信号平坦性校正的目的。

◆光学部分由背光探测器、高速激光器和光学透镜组等组成,主要功能是利用激光器将射频信号转换为光信号;探测器监测激光器的输出光功率;光学透镜实现将激光器输出的光信号耦合进入输出光纤中。

◆温控部分包含半导体制冷器(TEC)、热敏电阻等组成,主要功能是利用TEC对激光器的温度控制;热敏电阻监测激光器部分的工作温度,形成对光学部分工作温度的反馈控制。

◆逻辑控制部分包含微控制单元(MCU)、稳压电路、温度和光功率控制部分,主要功能是将对外部输入电压进行电压分配,并对激光器输出光功率以及TEC控制温度进行实时监测和反馈控制。

2 电/光转换组件的实现工艺

电/光转换组件的微组装装配工艺流程主要包含结构体加工、光路装配、微波贴装、电路组装、引线键合、组件调试、气密封焊和最终测试等步骤。各工艺步骤如下:

①结构体加工。使用机械加工方法完成可伐金属壳体的加工制备,并在TEC装配的高散热区域嵌入高导热铜,壳体表面电镀镍金,使用玻璃烧结方法完成低频供电插针装配,焊接方法完成射频连接器装配。光学输出端口也装配在金属结构体表面。

②光路装配。利用微组装工艺完成高速激光器、背光探测器、TEC和热敏电阻等装配。利用光学有源对准方式完成激光器芯片光学透镜组、输出光纤的耦合对准并完成光学透镜和光学输出尾纤的固化工艺,确保激光器输出光信号高效地耦合进入输出光纤中。

③微波贴装。利用环氧导电胶完成电路片以及微波芯片的精密贴装工艺,并在高温下对贴装后的器件进行固化,保障其具备良好粘附性和导电性。

④电路组装。利用微组装工艺完成逻辑控制部分的组装,逻辑控制部分装配在盒体背面。

⑤引线键合。利用超声热压焊方法进行激光器芯

片、微波芯片以及传输线的金丝键合,实现微波射频信号和控制低频信号的互连。

⑥组件调试。对装配完成的组件进行初步调试,主要对其光学特性(如光功率、光波长)、微波特性(如射频插损、噪声系数)等进行初步测试。

⑦气密封焊。确认组件性能满足要求后,使用平行封焊机对壳体与盖板进行平行封焊,封焊后进行氦质谱检漏以判定气密性。

⑧最终测试。对最终平行封焊后的器件进行整体系统测试和筛选,主要匹配标准高速光电探测器完成其全指标测试,包括通道插损、噪声系数、输入1 dB压缩点(P1 dB)和输入三阶截交点(IIP3)等。

3 电/光转换组件测试结果

根据上述设计原理与工艺流程,本文制备了四通道微波光子的电/光转换组件,设计的实物样件如图2所示。可以看出,不同通道之间是通过金属隔腔来实现隔离,输入微波端口为小尺寸P型连接器(SMP)处理,输出为光学尾纤。电/光转换组件尺寸为45 mm×55 mm×13 mm,重量小于150 g。相比原来采用分离元器件实现的电/光转换功能,其尺寸和重量大大降低。

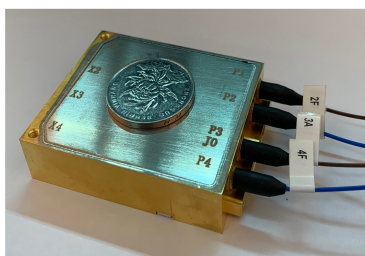


图2 电/光转换组件样件图

本文对制备的四通道电/光转换组件进行测量,表征其在2~18 GHz 9个倍频程内的电/光转换特性,主要测试参数有通道插损、噪声系数和IIP3等指标。

通道插损是电/光转换的核心指标,表征在整个光链路中对射频信号的损耗程度是通道设计以及增益分配的重要依据。本文利用20 GHz矢量网络分析仪,并采用标准20 GHz探测器来测量电/光转换组件的幅频特性,矢量网络分析仪输出功率为-10 dBm。测试结果如图3所示,在整个频段内通道插损均值为-9 dB,波动小于3 dB;对比电/光转换组件4个通道同频点的通道插损值,通道一致性较好,通道差异小于2 dB。通道插损曲线的波动主要是

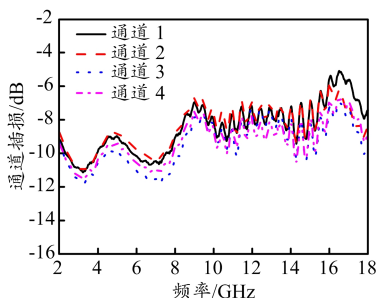


图3 四通道电/光转换组件幅频相应

由于测试电缆的驻波振荡导致。

噪声系数是电/光转换组件的另一个核心指标,表征在电/光转换时信噪比的恶化程度。本文利用噪声分析仪以及标准20 GHz光电探测器来表征电/光转换组件在2~18 GHz的噪声系数指标,测试结果图4所示。可以看出,2 GHz处噪声系数较低约为20 dB,自2~18 GHz噪声系数逐渐增大,在18 GHz处噪声系数达到最大值约为28 dB;而在16~18 GHz处,噪声系数迅速增加,这主要是由于接近激光器芯片的张弛振荡频率,总噪声功率中叠加了较大的激光器的相对强度噪声(RIN)所导致。对比电/光转换组件4个通道同频点的噪声系数,不同通道噪声系数一致性较好,通道差异约为1 dB左右。

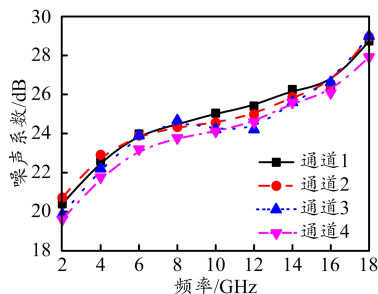


图4 四通道电/光转换组件噪声系数

在电/光转换过程中,组件的线性特性是影响微波光子应用的重要因素。本文使用信号源和频谱仪组合测量了该组件的P1 dB和无杂散动态范围3(SFDR3)等指标。该组件4个通道的输入P1 dB,在18 GHz处输入信号最先达到1 dB增益压缩,4个通道对应的输入P1 dB分别为4 dBm、3.7 dBm、4.2 dBm和4.4 dBm,该指标主要受限于微波通道且通道间一致性较好。利用2台20 GHz信号源、2~18 GHz微波合路器、光电探测器以及频谱仪测量了电/光转换组件的交调特性。输入射频信号频率为8 GHz,双音信号间频率间隔为0.1 GHz,输入信号功率为-16 dBm、-13 dBm、-10 dBm、-7 dBm、-4 dBm和-1 dBm。测量并记录输出主信号(一阶信号)和互调信号(三阶信号)的信号强度,如图5所示。采用线性拟合主信号和互调信号强度,得出通道1、通道2、通道3和通道4的IIP3值分别为13.4 dBm、13.26 dBm、14.01 dBm和14.43 dBm。

本文利用上述方法测量了2~18 GHz组件4个通道的IIP3值,测量频率间隔为2 GHz,组件4个通道的IIP3的测试结果如图6所示。可以看出,在4~8 GHz范围内,组件的IIP3处于较大值,为13 dBm左右;当频率较高时,在12~18 GHz范围内,组件IIP3处于较小值,为10 dBm左右。对比电/光转换组件4个通道同频点的IIP3值,通道一致性较好,差异小于1 dB。

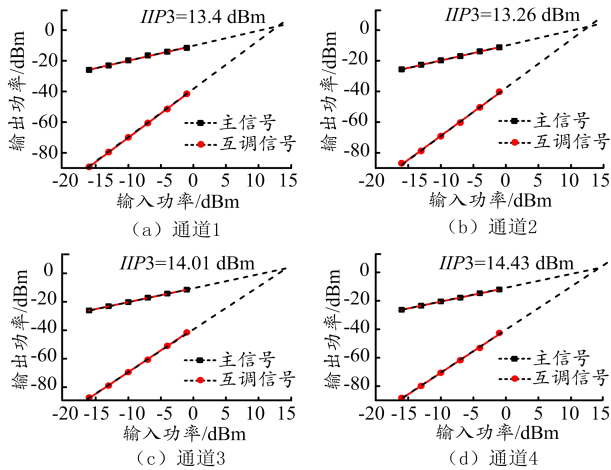


图5 电/光转换组件频率为 8 GHz 时的主信号和互调信号的关系

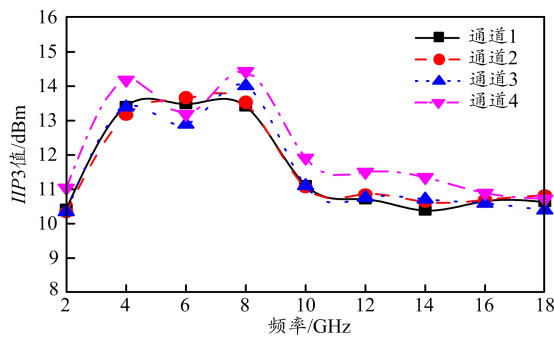


图6 电/光转换组件四通道的 IIP3 随频率关系

4 结束语

本文设计了一种基于封装集成工艺制备的四通道微波光子电/光转换组件,利用微组装混合封装工艺将激光器芯片、微波芯片、控制芯片、TEC 以及光学透镜封装于一个精密结构体内,并通过金丝键合实现信号互连,大大减少电/光转换组件尺寸,达到小型化、减重的目的。测试结果表明:该组件在 2~18 GHz 9 个倍频程内可以实现高效、高线性度的电/光转换能力,可在高密度阵列的电子战和雷达系统中作为微波光子集成前端使用。

参考文献:

- [1] CAPMANY J and NOVAK D. Microwave Photonics Combines Two Worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319–330.
- [2] YAO J P. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314–335.
- [3] AIWYN J S, KEITH J W. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628–4641.
- [4] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. Nature, 2014, 507(3): 341–345.
- [5] PAN S L, ZHU D, LIU S F, et al. Satellite Payloads Pay Off [J]. IEEE

Microwave Magazine, 2015, 16(8): 61–73.

- [6] MCKINNEY J D. Photonics illuminates the future of radar [J]. Nature, 2014, 507(7492): 310–312.
- [7] 洪俊, 姚胜兴, 王小虎, 等. 低噪声系数微波光子链路的设计 [J]. 光通信技术, 2016, 40(12): 5–7.
- [8] STEPHENS WE, JOSEPH TR. System Characteristics of Direct Modulated and Externally Modulated RF Fiber-Optic Links [J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(3): 380–387.
- [9] 王文博, 陈大雷, 戴宪策, 等. 基于多支路线性调频脉冲信号的波束成形技术研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(3): 54–58.
- [10] SCHIPPEERS H, VERPOORTE J, JORNA P, et al. Broadband optical beam forming for airborne phased array antenna [C]//2009 IEEE Aerospace conference, March 7–14, 2009, Big Sky, USA. Piscataway: IEEE, 2009: 1–19.
- [11] 胡总华, 聂奎营, 王旭. 基于光纤环级联结构的新型光电振荡器 [J]. 光通信技术, 2017, 41(3): 30–32.
- [12] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1996, 13(8): 1725–1735.
- [13] 姚登文, 杨春勇, 李春芳. 基于 RoF 系统的微波光子倍频传输特性研究[J]. 光通信技术, 2007, 31(3): 34–36.
- [14] 李嘉恒, 余建国, 李依桐, 等. 高集成硅基微波光子芯片的研究进展及趋势[J]. 光通信技术, 2017, 31(3): 1–4.
- [15] MARPAUNG D, ROELOFFZEN C, HEIDEMAN R, et al. Integrated microwave photonics [J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(4): 506–538.
- [16] CAPMANY J, MUNOZ P. Integrated Microwave Photonics for Radio Access Networks [J]. Light-wave Technol, 2014, 32(16): 2849–2861.
- [17] MEIJERINK A, ROELOFFZEN C G H, MEIJERINK R, et al. Novel Ring Resonator-based Integrated Photonic Beamformer for Broadband Phased-array Antennas Part I: Design and Performance Analysis [J]. Light-wave Technol, 2010, 28(1): 3–18.
- [18] LIU X D. Integrated optics and its applications [J]. Laser Technology, 1981, 5(2): 1–7.
- [19] STULEMEIJER J, VAN VLIET F E, BENOIST K W, et al. Compact photonic integrated phase and amplitude controller for phased-array antennas[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(1): 122–124.
- [20] YIFEI L, ASHISH B, RENYUAN W, et al. A Monolithically Integrated ACP-OPLL Receiver for RF/Photonic Links [J]. IEEE Photonics Technology Letter, 2011, 23(20): 1475–1477.
- [21] MAURIZIO B, CHRIS GHR, LEIMENG Z, et al. System integration and radiation pattern measurements of a phased array antenna employing an integrated photonic beamformer for radio astronomy applications [J]. Applied Optics, 2012, 51(7): 789–802.
- [22] AIMONE A, FREY F, ELSCHNER R, et al. DAC-less 32-GBd PDM-256-QAM using low-power InP IQ segmented MZM [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(2): 221–223.
- [23] LANGLEY L, ELKIN M, EDGE C, et al. Packaged semiconductor laser optical phase-locked loop (OPLL) for photonic generation, processing and transmission of microwave signals [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1999, 47(7): 1257–1264.
- [24] LUTE M. The optoelectronic oscillator [J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 728–730.