

引用本文: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.

一种超紧凑封装的光/电转换阵列模块

朱云柯^{1,2}, 陈少勇^{1,2}, 吕晓萌^{1,2}, 徐霄一^{1,2}, 周涛^{1,2*}

(1.中国电子科技集团公司第二十九研究所,成都610029;2.微波光子技术四川省重点实验室,成都610029)

摘要:针对传统微波光子产品通道数多、体积和功耗大、集成度低的问题,设计了一种基于微波光子混合集成封装技术的超紧凑封装光/电转换阵列模块,通过将光子器件、微波芯片、可调衰减芯片、电路系统封装入一个壳体内,可以在超紧凑空间内实现光/电转换、信号放大、衰减可调和均衡等多项功能。测试结果表明:该模块在2~18 GHz频段光电响应度较高,大于0.8 A/W;6个通道的S21的平均值为-3.5 dB,每个通道的平坦度在±1.5 dB以内,通道隔离度大于55 dB,且驻波反射小于1.7。

关键词:微波光子;混合集成封装;光/电转换;数控衰减;光耦合

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)06-0061-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.06.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Ultra-compact packaged optical/electrical conversion array module

ZHU Yunke^{1,2}, CHEN Shaoyong^{1,2}, LYU Xiaomeng^{1,2}, XU Xiaoyi^{1,2}, ZHOU Tao^{1,2*}

(1. The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610029, China;

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

Abstract: Aiming at the problems of large number of channels, large volume and power consumption and low integration of traditional microwave photonic products, an ultra-compact package optical/electrical conversion array module based on microwave photonic hybrid integrated packaging technology is designed. The photonic device, microwave chip, adjustable attenuation chip and circuit system are sealed into a shell. It can realize many functions such as optical/electrical conversion, signal amplification, attenuation adjustable and equalization in ultra-compact space. The test results show that the photoelectric responsiveness of the module is higher than 0.8 A/W in the 2~18 GHz band. The mean value of S21 for the six channels is -3.5 dB, the flatness of each channel is within ±1.5 dB, the channel isolation is greater than 55 dB, and the standing wave reflection is less than 1.7 dB.

Key words: microwave photonic, hybrid integrated packaging, optical/electrical conversion, digital step attenuator, optical coupling

0 引言

微波光子技术是研究高速光电子器件在微波系统中应用的一门学科^[1-4],已广泛应用于雷达、通信、干扰、电子战等领域^[5-10]。受电信、军工设备小型化和集成化趋势的影响,高密度集成的阵列化微波光子模块在各领域的应用需求越发凸显,在未来的发展也显示出巨

收稿日期:2023-09-02。

作者简介:朱云柯(1992—),男,硕士,工程师,主要研究方向为光子信息技术,包括光电子芯片、微波光子混合集成技术以及数字/射频类光系统的研发设计。

* **通信作者:**周涛(1978—),男,博士,中电29所首席专家,主要研究方向为微波磁光学、光纤通信技术和光子信息处理。



大的潜力^[11-13]。目前,国内外仅有少量公司拥有成熟的微波光子产品,这些产品一般都是基于分立的单通道光电元器件组合而成的,虽然产品的部分性能指标比较优秀,但是产品存在通道数多、体积和功耗大、集成度低等问题。因此,本文设计一种基于微波光子混合集成封装技术的超紧凑封装光/电转换阵列模块(下文简称光/电转换阵列模块),降低产品体积和功耗,提高集成度。

1 光/电转换阵列模块的设计与制备

本文设计的光/电转换阵列模块主要由高速探测器、微波放大器、均衡器、数控衰减器、耦合光纤、单片机(MCU)芯片、馈电芯片等组成,模块原理框图如图1

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

所示。光信号耦合到高速探测器转换为射频信号,射频信号再经过微波放大、均衡、数控衰减来补偿 2~18 GHz 宽带中的增益变化,使输出的 6 路射频信号的平坦度、通道间幅度一致性均较好。MCU 芯片通信控制电路部分通过金丝键合的方式实现低频互联。这种将多种芯片混合集成封装的方式可以在保证高性能光/电转换的同时,极大缩减封装空间。本文将从光路设计、微波设计和结构设计 3 个方面来介绍超紧凑封装的光/电转换阵列模块。

1.1 光路设计

光/电转换阵列模块的光路耦合采用直接耦合的方式。为了让探测器芯片光敏面充分接收出射光获得高响应度,出射光需在光纤下方出射。本文通过使用定制的具有高反射率的斜面透镜光纤,首先完成光路的翻转,然后将入射光由水平方向转换为垂直方向传输。这样可以有效地提高耦合效率,保证入射光在光纤端面全反射后进入探测器芯片的光敏面,实现低损耗的光信号到射频信号的解调。

光在斜面光纤中的传输方式示意图如图 2 所示。为了使得出射光在斜面发生全反射,减小光能损耗, θ_1 、 θ_2 必须满足如下条件:

$$\theta_1 = 90^\circ - \sin^{-1}(n_2/n_1) \quad (1)$$

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_1 - \sin^{-1}(1/n_1) \quad (2)$$

其中, θ_1 为光传输角度, θ_2 为斜面纤倾斜角度, n_1 为光纤纤芯折射率, n_2 为光纤包层折射率。

光/电转换阵列模块中使用的光纤是 G.652 光

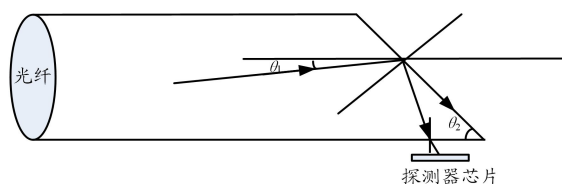


图2 斜面光纤中的光传输方式示意图

纤, $n_1=1.449$, $n_2=1.444$,通过式(1)可计算出 $\theta_1 \approx 4.77^\circ$ 。然后,根据式(2)可以计算出 $\theta_2=41.59^\circ$ 。因此,光在斜面发生全反射时 θ_2 满足的条件为 $\theta_2 \leq 41.59^\circ$ 。

1.2 微波设计

微波部分由高速调制器、微波放大器、均衡器、数控衰减器组成,如图3所示。在设计微波链路时考虑到微波光子整体链路增益为-23 dB左右,因此使用了增益为23 dB的微波放大器来补偿链路增益。数控衰减器的插入损耗为2 dB,通过RS485通信可以灵活调整0~15 dB的通道衰减量来满足系统链路指标要求。在微波链路末端使用插入损耗为1 dB的均衡器进行各个通道的增益曲线优化,让增益曲线更加平坦,最终获得到S21平均值约为-3.5 dB的曲线。

模块内部采用金丝键合技术进行低频互联。由于

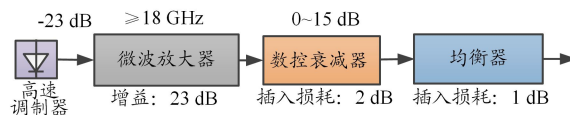


图3 微波部分组成框图

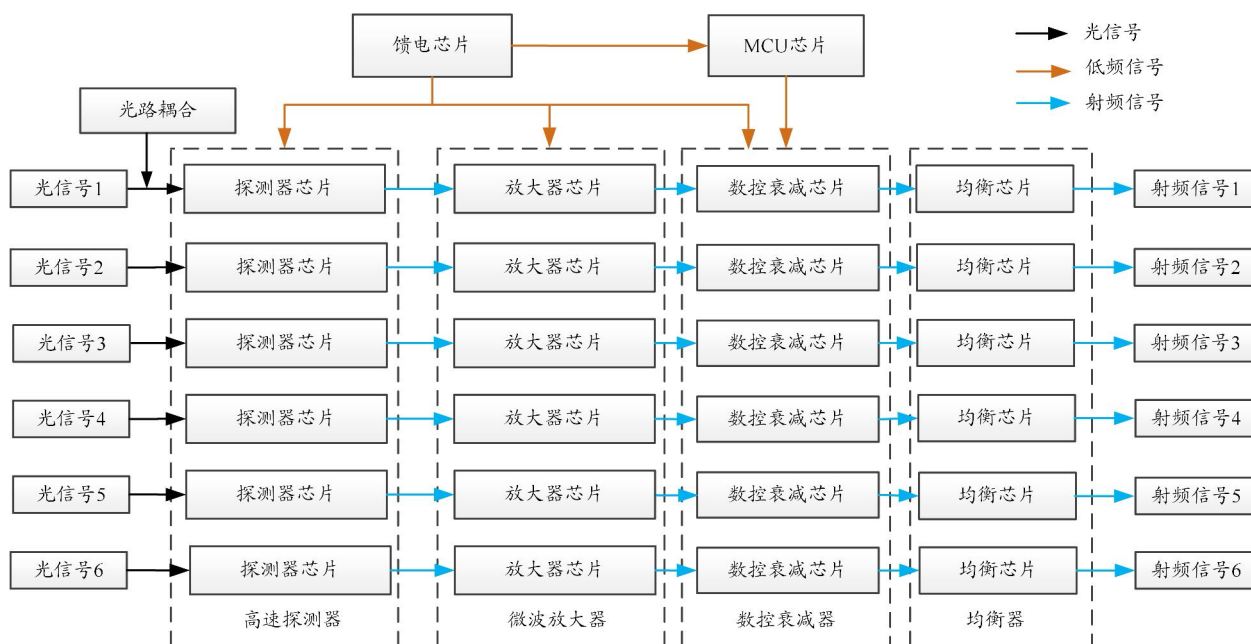


图1 光/电转换阵列模块原理框图

金丝呈现出电感特性,这会阻碍高频光电流输出,导致高频响应信号幅度下降。为了改善高频响应特性,实现射频信号的高保真度传输并保证性能,可以将探测器芯片、放大器芯片、微带线等高频芯片放在同一平面,以减少金丝键合长度。此外,这样的布局还降低了模块体积并增强抗干扰能力。

1.3 结构设计

光/电转换模块采用整体铣削成型,内腔进行铣削以满足元器件的装配需求;管壳基体采用可伐合金,壳体材料密度为 8.5 g/cm^3 ;上下盖板采用平行缝焊的形式进行密封。为了实现光/电转换阵列模块小体积集成,同时满足环境适应性要求,本文将射频通道和光通道放在正面一侧,驱动控制电路放在背面,驱动控制板的电源信号检测端子采用玻璃绝缘子与射频、光链路相连。壳体与玻璃绝缘子采用一体化烧结技术组装在一起。

由于光/电转换模块工作频率较高,电路既有探测器、放大器、微带线等元件,这些元件结构紧凑,通道数多,在防止杂波干扰的同时还需满足散热要求。因此,腔体设计时将每一路的射频传输电路放置在独立的屏蔽通道内,保证各路通道之间的屏蔽、隔离。壳体和屏蔽腔为铣出的金属腔体,既对微波电路进行保护,又可用于信号的电屏蔽。图4是光/电转换阵列模

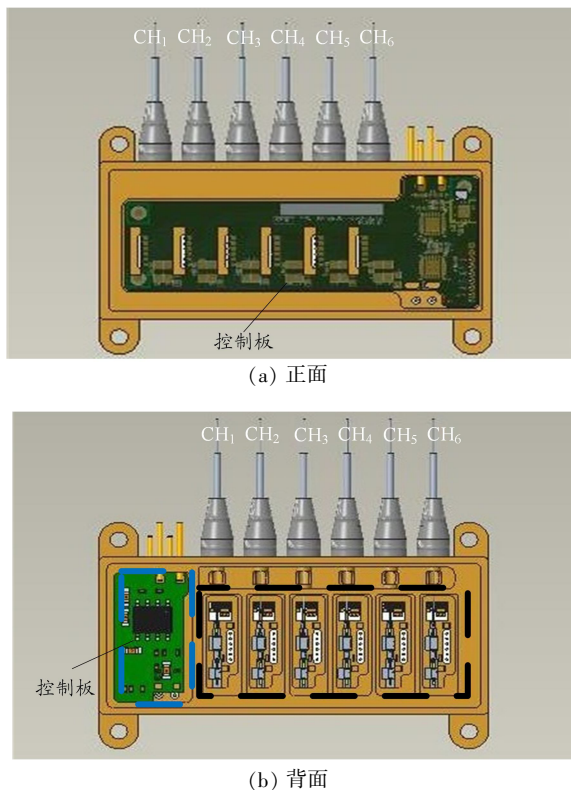


图4 光/电转换阵列模块射频传输通道和控制板结构图

块的射频传输通道和控制板结构图。

光/电转换模块的壳体尺寸为 $50 \text{ mm} \times 28 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 。6通道($\text{CH}_1 \sim \text{CH}_6$)光/电转换阵列模块与单通道光电探测器实物对比如图5所示。与传统的商用单通道微波光子器件相比,利用微波-光子混合微组装技术可以在封装中实现光/电转换阵列模块的小型化,其尺寸大小有着巨大的优势。

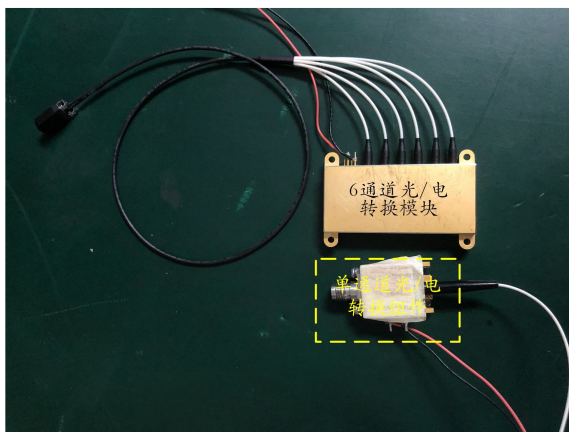


图5 光/电转换阵列模块与单通道探测器实物对比图

2 光/电转换阵列模块性能测试

光/电转换阵列模块的性能测试系统框图如图6所示。系统由矢量网络分析仪、计算机、外调激光器、

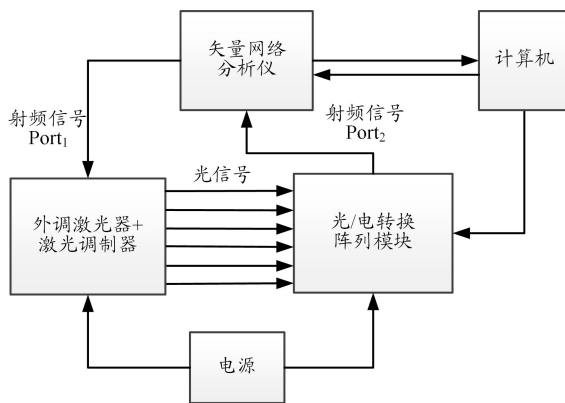


图6 光/电转换模块测试系统框图

激光调制器^[14-18]、光/电转换阵列模块、电源组成。

2.1 S21 和 S22 曲线特性

矢量网络分析仪校准后,将矢量网络分析仪的Port₁、Port₂分别连接到链路的射频信号输入端口和输出端口来测量链路的性能,测得S21曲线和S22曲线分别如图7、图8所示。从图7可以看出,每个通道的平坦度都在 $\pm 1.5 \text{ dB}$ 以内波动,S21的平均值(通道在全频段内最大值+最小值之和除以2)约为 -3.5 dB ;不同通道之间保持了较好的通道一致性,同一频点的幅度

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

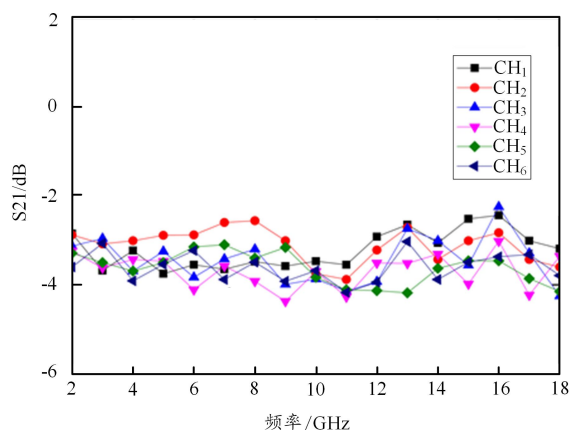


图7 光/电转换模块的S21曲线特性

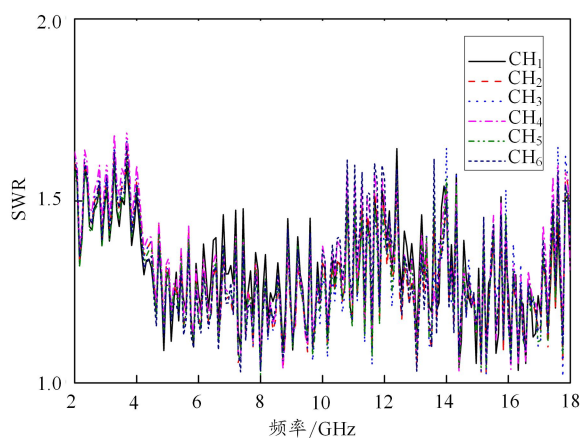


图8 光/电转换模块的S22曲线特性

差小于1.5 dB。从图8可以看出,6个通道在2~18 GHz范围内输出的S22曲线的驻波比(SWR)均在1.7以下,这证明了阵列化光/电转换模块有较好的阻抗匹配性能。

2.2 光电响应度

光电响应度是指光电流与光功率之比,响应度越高,表示光/电转换效率越高,即光电探测器对光信号的响应能力越强。光/电转换阵列模块的光电响应度测试使用的是可调节光源,设置光源的输出功率为5 mW,波长为1 310 nm。将光信号注入到模块的每个通道,通过测试输入光纤的光功率与探测器芯片输出的光电流的比值计算每个通道的光电响应度,结果如表1所示。可以看出,各通道的光电响应度较高,即光/电转换效率较好,这表明斜面透镜光纤与探测器的耦合可以实现相对高的耦合效率。

2.3 响应电流

为了平衡噪声系数和增益指标,链路中的激光器光功率一般为10 dBm左右。为匹配链路上高光功率的激光器,需要提高光/电转换模块的饱和功率,因此

表1 光/电转换阵列模块响应电流测试结果

通道	注入光功率/mW	光电流/mA	光电响应度/(A/W)
CH ₁	5	4.02	0.804
CH ₂	5	4.1	0.82
CH ₃	5	4.05	0.81
CH ₄	5	4.1	0.82
CH ₅	5	4.08	0.816
CH ₆	5	4.06	0.812

提升探测器芯片的反向偏置电压,可以有效地提高光生载流子的漂移率以达到提高饱和光功率的目的。将反向偏置电压设置为2、3、4、5 V,使用可调谐窄带光源将输入的光功率从5 mW逐渐增加到16 mW,测试记录光/电转换阵列模块中光生电流的大小。通过测试不同反向偏置电压下光生电流和注入光功率之间的相关性,得到了光/电转换阵列模块的输入光功率-响应电流曲线如图9所示。可以看出,当输入的光功率大于8 mW、反向偏置电压为4 V时,电流开始被压缩,响应电流和输入光功率不再呈现线性相关性,当反向偏置电压为2、3 V时压缩更明显;将反向偏置电压调整到5 V,输入光功率为5~16 mW时,响应电流与输入功率始终保持良好的线性关系。因此,通过将电源模块的反向偏置电压调整为5 V,可以有效地覆盖大多数微波光子链路应用。

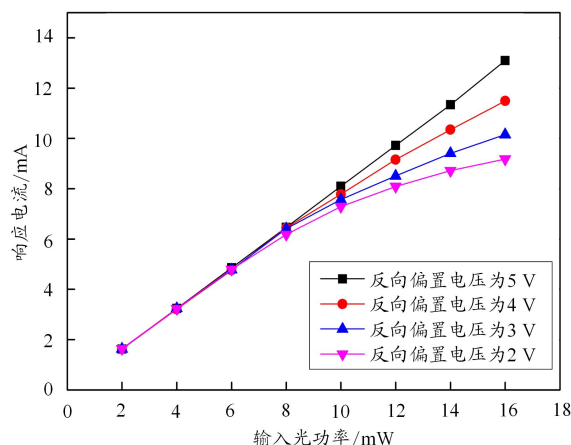


图9 光/电转换模块的输入光功率-响应电流曲线

2.4 相邻通道隔离度

微波光子链路中,传输的高频信号波长很短,信号传输的延时效应会激发电磁波特性,微波腔体里的电路会受到电磁能量的干扰,相邻通道的互相串扰会严重影响信号质量。为了避免多路之间的干扰,最大化降低模块通道间的串扰,每个通道的射频电路都放

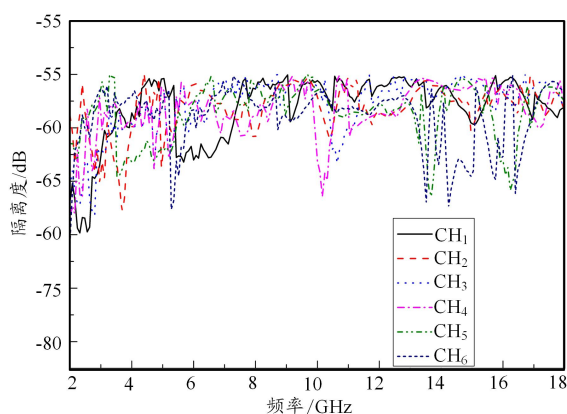


图 10 光/电转换阵列模块相邻通道间隔离度曲线

置在独立的屏蔽腔内形成信号电屏蔽。图 10 是相邻通道间的隔离度测试结果, 可以直观地看出相邻通道之间的隔离度大于 55 dB, 这证实了模块的金属隔离腔有着较好的防串扰效果。

3 结束语

本文设计了一种超紧凑光 / 电转换阵列模块, 该模块采用混合集成微组装工艺制造, 能够在同一封装中混合集成多路光学通道和微波功能电路。通过光路设计, 模块的光 / 电转换效率大于等于 0.8 A/W; 通过微波电路设计, 模块 6 个通道的 S21 的平均值为 -3.5 dB 左右, 平坦度在 ± 1.5 dB 以内, SWR 低于 1.7, 通道间幅度一致性小于 1.5 dB; 通过一体化封装结构设计, 通道隔离度大于 55 dB, 模块尺寸为 50 mm $\times$ 28 mm $\times$ 7 mm。该阵列模块工作带宽覆盖了 2~18 GHz 波段, 实现了多通道光 / 电转换功能, 具有体积小、重量轻、适用范围广等优点, 解决了目前微波光子传输链路系统中分立的单通道器件过多而导致整个链路非常冗杂、占用空间大、不利于系统小型化的问题, 在大容量微波光子传输系统内有着广泛的应用前景。

参考文献:

[1] TANG Z Z, ZHANG F Z, PAN S L. 60-GHz RoF system for dispersion-free transmission of HD and multi-band 16QAM [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(14): 1305–1308.
[2] DAT P T, KANNO A, YAMAMOTO N, et al. Seamless convergence of fiber and wireless systems for 5G and beyond networks[J]. Journal of Light-

wave Technology, 2019, 37(2): 592–605.
[3] 高晖, 邓晔, 张金平, 等. 微波光子相控阵的技术分析与展望[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 251–261.
[4] WILLIAMSON R AND ESMAN R. RF photonics[J]. Journal of Light-wave Technology, 2008, 26(9): 1145–1153.
[5] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319–330.
[6] COX C H. Analog optical links: theory and practices [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
[7] COSTA I F, SPADOTI D H, SODRE A C, et al. Optically controlled re-configurable antenna for 5G future broadband cellular communication networks[J]. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2017, 16(1): 208–217.
[8] HERVAS J, RICCHIUTI A L, LI W, et al. Microwave photonics for optical sensors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 27–339.
[9] LI M, ZHU N H. Recent advances in microwave photonics[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2016, 9(2): 160–185.
[10] MARPAUNG D, ROELOFFZEN C, HEIDEMAN R, et al. Integrated microwave photonics[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(4): 506–538.
[11] LI C Y, AN J, ZHANG J S, et al. 4 $\times$ 20 GHz silica-based AWG hybrid integrated receiver optical sub-assemblies[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(6): 33–37.
[12] LV X M, WU Y L, LIAO A, et al. Photoelectric characteristics of an 18 GHz electronic-opto modulator [C]//2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), August 12–15, 2020, Guangzhou, China. New York: IEEE, 2020: 1–3.
[13] LIU L, CHANG L M, KUANG Y X, et al. Low-cost hybrid integrated 4 $\times$ 25 GBaud PAM-4 CWDM ROSA with a PLC-based arrayed waveguide grating de-multiplexer[J]. Photonics Research, 2019, 7(7): 722–727.
[14] CHOI K S, KWON Y H, CHOE J S, et al. Development of packaging technologies for high-speed (>40 Gb/s) optical modules[J]. IEEE Journal of Telected Topics in Quantum Electronics, 2016, 12(5): 1017–1024.
[15] PU T, WANG W W. Study on the characteristic and application of DFB semiconductor lasers under optical injection for microwave photonics [C]//SPIE. Proceedings of 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Optical Signal Processing. International Society for Optics and Photonics. Washington: SPIE, 2018: 10617-1–10617-2.
[16] DU M L, ZHENG P F, LI J, et al. Photonic generation of frequency-doubled microwave waveforms based on cascaded Mach-Zehnder modulator[J]. Optik, 2021, 240: 166933-1–166933-10.
[17] 曾羽婷, 周慧, 陈明, 等. 基于 18 倍频技术的 60 GHz 光载无线通信系统研究[J]. 光电子·激光, 2019, 30(7): 704–711.
[18] ISMAIL M M, OTHMAN M A, ZAKARIA Z, et al. EDFA-WDM optical network design system[J]. Procedia Engineering, 2013, 53: 294–302.