

DOI:10.16136/j.joel.2022.10.0056

基于微波光子混合封装技术的多通道解复用光/电转换组件

许玮华^{1,2}, 吕晓萌^{1,2*}, 廖 翱^{1,2}, 伍艺龙¹, 张童童^{1,2}, 李希斌^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036; 2. 四川省宽带微波电路高密度集成工程研究中心, 四川 成都 610036)

摘要: 基于微波光子混合封装技术, 制备了多通道解复用光/电 (optical-to-electrical, O/E) 转换组件。将光芯片、微波芯片、空间透镜、微波电路进行一体化混合封装在同一壳体内, 使得组件具备解波分复用、O/E 转换、微波处理等多种功能, 从而实现将 1 路波分复用的光载射频信号解调至 6 路射频 (radio frequency, RF) 信号并放大后对外输出。多通道解复用 O/E 转换组件包含了解复用器、聚焦透镜、光电探测器 (photodetector, PD)、微波放大器、均衡器以及电源等多专业裸芯片, 利用混合集成封装技术, 极大缩减了产品的尺寸, 提高了集成度和复杂度, 在大容量微波光子应用领域中具有极大潜力。通过对制备的 O/E 转换组件进行测试, 结果表明该组件可实现光载射频信号到 RF 信号的宽带转换, 光电转换效率在 0.7 A/W 以上。同时测试了 O/E 转换组件的幅频特性, S₂₁ 均值为 -8.4 dB, 在通带内波动范围在 ±3.5 dB 之间, 驻波反射小于 2 dB, 且通道间隔离度达到 40 dBc 以上。

关键词: 微波光子; 混合封装技术; 解波分复用; 光/电 (O/E) 转换

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)10-1031-07

A multichannel demultiplexed optical-to-electrical conversion module based on microwave photonic hybrid-packaging technology

XU Weihua^{1,2}, LV Xiaomeng^{1,2*}, LIAO Ao^{1,2}, WU Yilong¹, ZHANG Tongtong^{1,2}, LI Xibin^{1,2}

(1. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036, China; 2. Sichuan Province Engineering Research Center for Broadband Microwave Circuit High Density Integration, Chengdu, Sichuan 610036, China)

Abstract: Based on microwave photonic hybrid-packaging technology, a multichannel demultiplexed optical-to-electrical (O/E) conversion module is fabricated. Optical chip, microwave chip, free-space lens, and microwave circuit are packaged in a cavity, making the module combine the function of demultiplexing, O/E conversion and microwave processing to achieve the conversion from 1-channel multiplexed radio-over-fiber signal to 6-channel radio frequency (RF) signal and to output the signal after amplifying. The multichannel demultiplexed O/E conversion module is composed of several bare chips such as demultiplexer, focusing lens, photodetector (PD), microwave amplifier, equalizer, and power supply, which utilizing hybrid integrated packaging technology to greatly reduce the size of the module and improve integration and complexity of the module. The module shows huge potential in application of multi-functional microwave photonic area. The test results show that the module can realize the broadband conversion between radio-over-fiber signal to RF signal, and the efficiency of the O/E conversion exceeds 0.7 A/W. In addition, the test results of the amplitude-frequency characteristics show that the mean value of S₂₁ is -8.4 dB, with a fluctuation of ±3.5 dB. The test results also show that the reflection of standing wave

* E-mail: 342721062@qq.com

收稿日期: 2022-01-23 修订日期: 2022-03-15

is less than 2 dB, and the isolation degree between adjacent channels is above 40 dBc.

Key words: microwave photonic; hybrid-packaging technology; wavelength division demultiplexing; optical-to-electrical (O/E) conversion

1 引言

微波光子技术结合微波和光子学技术,以其大带宽、低传输损耗、高速处理能力和强抗电磁干扰能力等优势,从最初的军事应用迅速拓展至民用领域,比如蜂窝通信、卫星通信、有线电视、传感网络和医学成像等^[1-7]。利用微波光子技术将微波信号上变频至光频,可获得丰富的处理带宽,再利用低损耗光纤替代同轴电缆,可实现宽带信号长距离高保真传输。比如在移动通信和分布式侦查中^[8,9],需要大量天线来扩展服务的覆盖范围,在这种情况下,可将信号处理单元集中在中心站,与天线分开放置,利用光载无线通信技术实现远端控制处理。此外,即使天线分散部署在恶劣环境中,处理单元也可集中布置在相对友好的环境中,从而将外部环境的影响降到最低。

目前大部分微波光子系统主要由分立元件搭建组成,比如激光器、调制器、波分复用器、探测器及相应的微波处理器件等^[10-15]。这些器件体积大、功耗高、缺乏灵活性,而且器件之间多级光纤尾纤的互连增加了系统的装配难度。通过采用微波光子混合集成封装技术,可将光芯片、微波芯片、馈电以及逻辑控制芯片封装在一个管壳内,并分别利用透镜耦合技术实现光信号的互连和金丝键合技术实现电信号的互连,可以突破由分立器件搭建系统的瓶颈,适应系统小型化阵列化的趋势^[16-19]。

在本研究中,利用微波光子混合集成封装技术,实现将波分复用、探测器、微波放大及均衡、电源等芯片混合封装集成,设计并制备了多通道解

复用光/电(optical-to-electrical, O/E)转换组件,经测试实现了 2—18 GHz 宽带光信号到微波信号的转换,通带内具备良好的幅频平坦度和通道间隔离度,且体积相比原分立微波光子 O/E 转换模块大幅缩小,集成度明显提升。

2 多通道解复用 O/E 转换组件的设计与制备

本文设计的微波光子多通道 O/E 转换组件的原理框图如图 1 所示,主要由波分解复用器、光电探测器(photodetector, PD)、微波放大器、均衡器以及相应馈电等裸芯片组成。组件设计采用空间透镜代替传统光纤熔接方式实现光信号互连;采用微波传输线(transmission line, Tline)代替传统同轴电缆实现射频(radio frequency, RF)信号互连;采用金丝金带代替传统导线实现低频信号互连。组件实现了将输入的 1 路波分复用的光载射频信号(包含 6 个波长,分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_6$)转换成 6 路宽带 RF 信号输出,极大地减小了 O/E 转换组件的体积,适用于集成度和复杂度有更高要求的应用场景。

组件中 O/E 信号转换的具体流程为:输入的一路合波光信号通过解波分复用器分成 6 路不同波长的光信号,并利用光学透镜将这些光信号分别耦合到高速探测器的光敏面上。在高速 PD 芯片中实现将调制的光信号转换为 RF 信号。转换后的 RF 信号通过微波 Tline 传输至微波放大器和均衡器从而实现 RF 信号的放大和幅频平坦度的调节,最后通过 RF 同轴连接器对外输出。

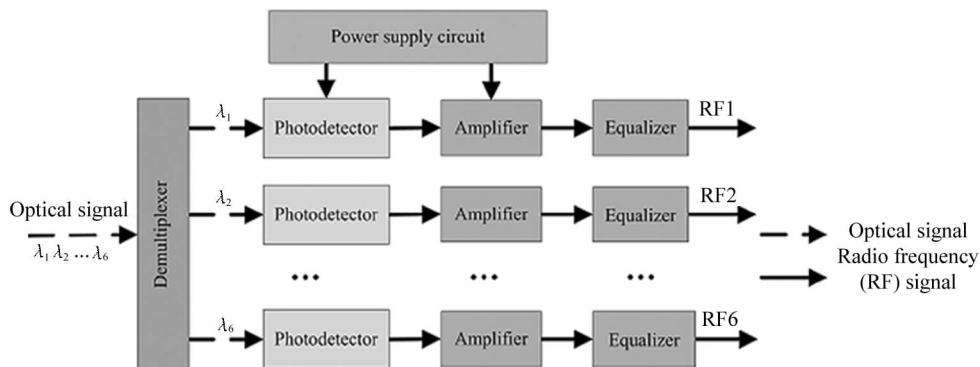


图 1 多通道解复用 O/E 转换组件的原理框图

Fig. 1 The block diagram of the multichannel demultiplexed O/E conversion module

下面本文将从光路、微波和结构 3 个方面来介绍多通道解复用 O/E 转换组件的设计,并根据设计方案制备了实物。

2.1 光路部分设计

多通道解复用 O/E 转换组件的光路部分组成如图 2 所示。外部光源与 O/E 转换组件通过光纤进行互连,合波光信号沿光纤进入组件内部。输入的光信号通过透镜 Lens1 扩束成平行光束,经过壳体上的光窗入射壳体,再通过波分解复用器将输入的一路合波光信号分解成六路单波长光信号,接着通过阵列聚焦透镜 Lens2 将光信号高效耦合输入至高速探测器的光敏面,实现调制光信号到 RF 信号的转换。

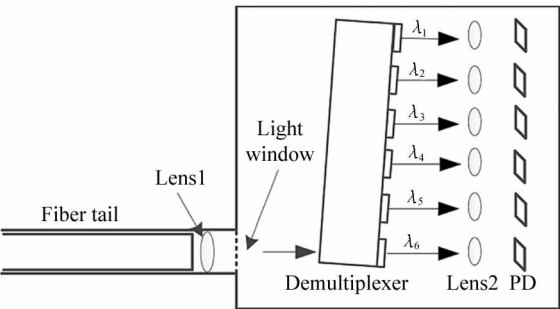


图 2 光路部分组成图
Fig. 2 The schematic of optical section

将多通道解复用 O/E 转换组件的输入光纤与波长可调谐光源相连接,设置光源的光功率 P 为 5 mW,调节光源的中心波长依次与表 1 中通道 CH1—CH6 的波长一致,并用数字源表对当前波长对应通道的 PD 的响应电流 I 进行采集,得到测试结果如表 1 所示。从表中可看出 6 个通道 PD 的响应电流分别为 3.52 mA、3.82 mA、3.5 mA、3.6 mA、3.55 mA、3.83 mA。根据 PD 响应度计算公式: $R_{PD} = I/P$,通过计算可得各通道响应度均在 0.7 A/W 以上,说明能够实现光信号到 PD 的高效耦合,从而实现高效的 O/E 转换功能。

同时,利用可调谐激光器对每个通道的波长进行扫描,并用数字源表对每个通道的 PD 响应电流进行采集,实现对不同通道的波长带宽进行测试,各通道的 1 dB 带宽测试结果如表 2 所示,从表中可以看出:CH1 和 CH6 的 1 dB 带宽达到 15 nm 以上,CH2—CH5 通道的 1 dB 带宽达到 3 nm 以上。以 CH3 通道为例,测试得到带宽与响应电流的曲线如图 3 所示,从图中可以看出:顶部曲线比较平坦,且整个

曲线矩形度较好,中心波长处的响应电流为 3.5 mA,说明波分复用器在通带内响应度平坦且插入损耗小。因此通过利用波分复用器上的 6 个薄膜滤波片可以有效实现将一路合波光信号进行波分解复用为 6 个不同波长的光信号,且具有相对平坦的光谱和低插入损耗的优势,可适应大容量微波光子系统远距离高保真的传输需求。

表 1 各通道 PD 响应电流测试结果
Tab. 1 Test results of PD response current in each channel

Channel	Design value of center wavelength /nm	Response current/mA	Responsivity /(A/W)
CH1	1 271	3.52	0.704
CH2	1 294.12	3.82	0.764
CH3	1 298.62	3.5	0.7
CH4	1 302.99	3.6	0.72
CH5	1 307.71	3.55	0.71
CH6	1 331	3.83	0.766

表 2 各通道波长范围(@-1 dB)测试结果
Tab. 2 Test results of wavelength range (@-1 dB) in each channel

Channel	Test value of left wavelength/nm	Test value of right wavelength/nm	Bandwidth /nm
CH1	1 261.9	1 279.1	17.2
CH2	1 292.55	1 296.01	3.46
CH3	1 296.98	1 300.62	3.64
CH4	1 301.66	1 304.96	3.3
CH5	1 306.08	1 309.66	3.58
CH6	1 322.81	1 338.61	15.8

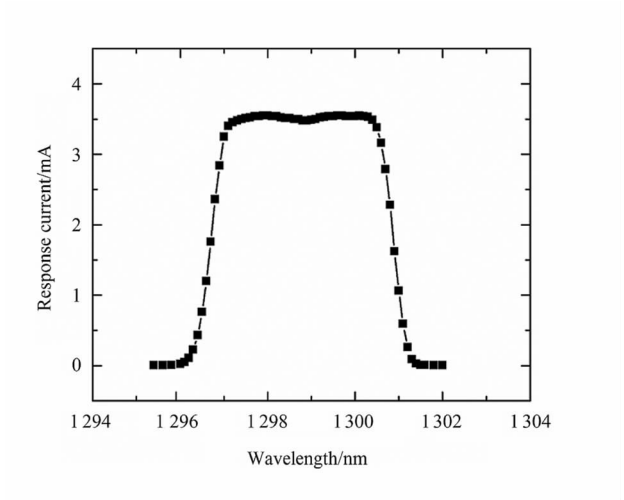


图 3 光链路带宽-响应电流曲线
Fig. 3 The relationship of bandwidth and response current in optical link

2.2 微波部分设计

微波部分采用隔腔设计,每一路由放大器芯片、均衡器芯片、Tline 与 RF 绝缘子组成,如图 4 所示。由于 PD 芯片之间的间隔与微波芯片之间的间隔宽度不一致,因此前端采用一个扇形 Tline 来实现对应通道间的互连。芯片和 Tline 之间、放大器芯片与均衡器芯片之间均采用金丝键合的形式实现互连,RF 输出的对外接口采用小尺寸 RF 同轴连接器。RF 信号经过微波放大器来实现对信号的放大来弥补信号通过光链路引入的损耗;考虑到宽带微波系统的响应曲线倾向于呈现负增益斜率,因此在后端通过采用正斜率均衡器来调整通带内幅频曲线的平坦度。

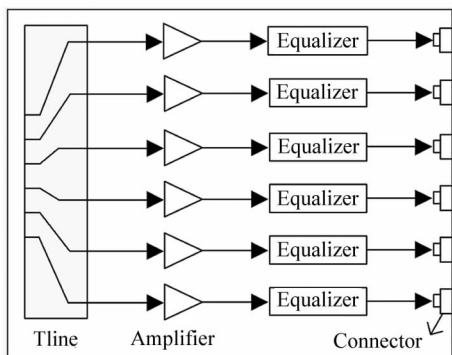


图 4 微波部分组成图

Fig. 4 The schematic of microwave section

通过矢量网络分析仪可实现微波链路的传输性能测试,将矢量网络分析仪的 PORT1/PORT2 端口分别连接微波链路部分的输入/输出 RF 端口来测量其幅频特性,得到的增益曲线(S21 曲线)如图 5 所示。从图中可看出:组件内各通道微波链路之间具有良好的幅度一致性,并且在 2 GHz 处实现 12 dB

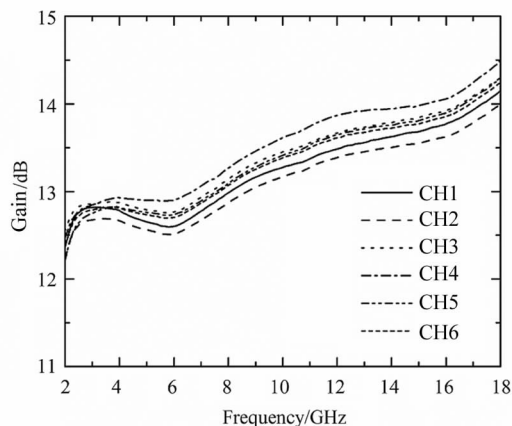


图 5 微波链路幅频响应曲线

Fig. 5 The relationship of amplitude and frequency in microwave link

以上增益,在 18 GHz 处实现 14 dB 以上增益;在 2—18 GHz 频段可实现 2 dB 左右的均衡量。

2.3 结构部分设计

组件结构体采用可伐合金 4J29 材料作为盒体材料,主要是因为可伐合金具有与玻璃或者陶瓷等封装材料相匹配的膨胀系数,可使组件满足宽温的环境适应性要求。在光路部分与微波部分中间选用 AlN 陶瓷基板来实现互连,陶瓷基板具有高导热性、良好的电绝缘性能以及相匹配的热膨胀系数等优势。

基于上述设计方案,利用微波光子混合集成技术制备了多通道解复用 O/E 转换组件,实物样件如图 6 所示。组件外形尺寸为 40 mm × 40 mm × 7 mm,其中光信号输入接口采用单根光纤输入的形式,RF 输出接口采用小尺寸的 RF 同轴连接器,组件通过绝缘子针供电。新设计的多通道解复用 O/E 转换组件相比传统的由分立器件组合而成的相同功能的模块,集成度得到明显提升,适用于高密度和多功能的微波光子系统应用。



图 6 多通道解复用 O/E 转换组件样件图

Fig. 6 Photograph of multichannel demultiplexed O/E conversion module

3 多通道解复用 O/E 转换组件性能测试

微波光子链路一般由电/光(electrical-to-optical, E/O)转换部分、光纤和 O/E 转换部分组成,实现 RF 信号与光信号之间相互转化的功能。因此需采用标准 E/O 转换模块(包含 40 mW 激光器和 20 GHz 电光调制器,其中激光器的波长与表 1 中 CH1—CH6 的中心波长相匹配),与该多通道解复用 O/E 转换组件组成微波光子链路来测试其 RF 信号的响应特性。

按照图 7 搭建测试系统,标准 E/O 转换模块与

多通道解复用 O/E 转换组件之间通过光纤进行互连,通过将矢量网络分析仪的 PORT1 分别连接标准 E/O 转换模块的 6 个匹配光源所对应通道的 RF 输入端口,PORT2 对应连接 O/E 转换组件的 6 个 RF 输出端口来测量组件的每一路宽带幅频特性,增益曲线(S21 曲线)和驻波曲线(S22 曲线)分别如图 8 和图 9 所示。从图 8 中可以看出:该 O/E 转换组件

在 2—18 GHz 范围内的增益曲线均值为-8.4 dB,在通带内增益波动范围在±3.5 dB 之间,对比各个通道间同频点的 S21 值,通道间幅度一致性小于±2 dB。从图 9 中可以看出该 O/E 转换组件的 6 个通道在 2—18 GHz 范围内的输出驻波均小于 2,说明实现了良好的阻抗匹配。

通道隔离度是衡量产品工作时不同通道间的信

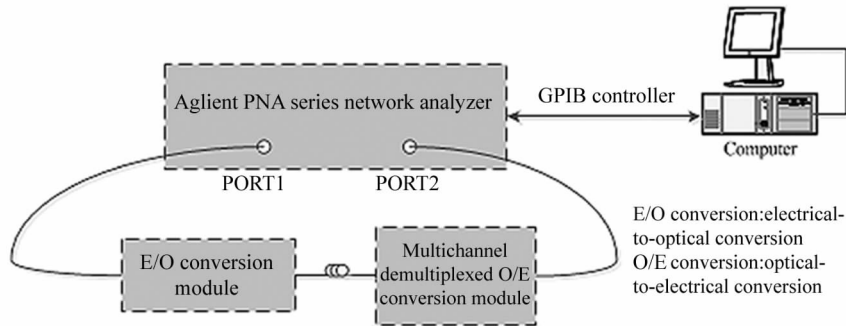


图 7 O/E 转换组件测试框图
Fig. 7 Test block diagram of the O/E conversion module

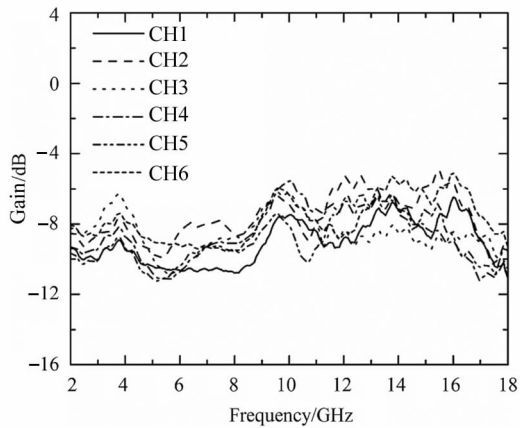


图 8 O/E 转换组件的 S21 曲线

Fig. 8 S21 curve of the O/E conversion module

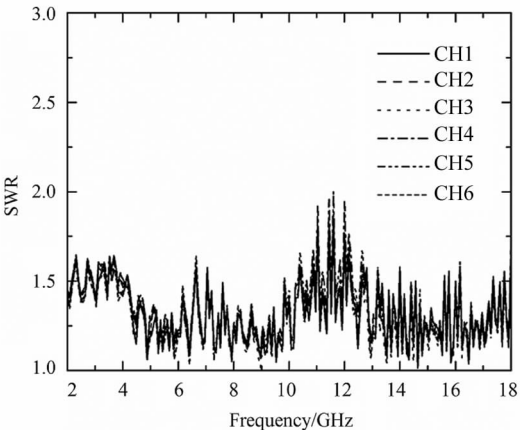


图 9 O/E 转换组件的 S22 曲线

Fig. 9 S22 curve of the O/E conversion module

号串扰强度的指标,而相邻通道由于更加容易引入串扰其隔离度指标尤为重要。为了改善 O/E 转换组件通道间的串扰,各通道之间采用隔腔设计,并且在盖板上粘贴吸波材料来消除多余电磁波的干扰,相邻通道间的隔离度测试结果如图 10 所示。以 CH1-CH2 通道间隔离度测试为例,通过将矢量网络分析仪 PORT1/PORT2 分别连接标准 E/O 转换模块的输入端口和 O/E 转换组件的 CH1 输出端口,记录其增益曲线line1,然后保持PORT1的连接不变,将 PORT2 连接至 O/E 转换组件的 CH2 输出端口,记录其增益曲线line2,两根增益曲线的差值即是

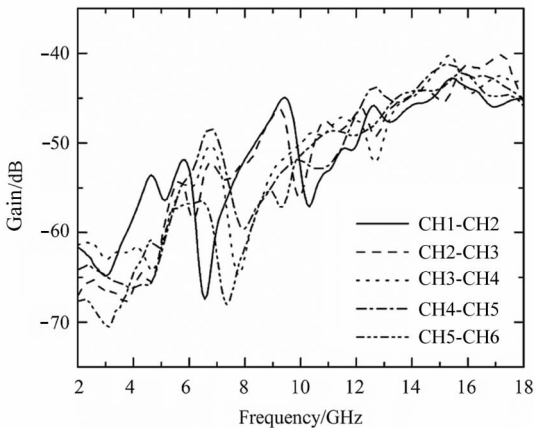


图 10 O/E 转换组件相邻通道间隔离度曲线

Fig. 10 The isolation curves between adjacent channels of the O/E conversion module

CH1-CH2 通道间的隔离度曲线,在工作带宽内其最小值为 42.79 dB。同样地,可测得其余相邻通道之间隔离度在工作带宽内的最小值,分别为 40.14 dB、40.22 dB、41.24 dB、42.17 dB,可看出这些隔离度最小值指标均在 40 dB 以上,说明组件具有良好的通道隔离效果。

4 结 论

本文提出的多通道解复用 O/E 转换组件采用了光电混合封装结构,将光学芯片和电学芯片嵌入一个结构体中,在极小的尺寸约束下实现光信号到射频信号的高效转换,且具有良好的增益平坦度、通道间幅度一致性以及通道间隔离度。该组件工作带宽覆盖了 S、C、X、Ku 波段,可实现宽带光载射频信号的光电转换功能,在大容量微波光子传输系统内有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] CAPMANY J,NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics,2007,1(6):319-330.
- [2] MARPAUNG D,ROELOFFZEN C,HEIDEMAN R,et al. Integrated microwave photonics[J]. Laser & Photonics Reviews,2013,7(4):506-538.
- [3] COSTA I F,SPADOTI D H,SODRE A C,et al. Optically controlled reconfigurable antenna for 5G future broadband cellular communication networks[J]. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications,2017,16(1):208-217.
- [4] 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):327-339.
- [5] LI M,ZHU N H. Recent advances in microwave photonics[J]. Frontiers of Optoelectronics,2016,9(2):160-185.
- [6] DARYOUSH A S. RF and microwave photonic techniques in biomedical applications[C]//2009 IEEE Sarnoff Symposium, March 30-April 1, 2009, Princeton, NJ, USA. New York:IEEE,2009:1-6.
- [7] RAGHUWANSHI S K,SRIVASTAVA N K. Review of microwave photonics technology in the context of remote sensing application[J]. Reviews in Theoretical Science,2017,5:1-8.
- [8] WAKE D,WEBSTER M,WIMPENNY G,et al. Radio over fiber for mobile communications[C]//2004 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (IEEE Cat. No. 04EX859), October 4-6, 2004, Ogunquit, ME, USA. New York:IEEE,2004:157-160.
- [9] WANG J Z,ZHU H L,GOMES N J. Distributed antenna systems for mobile communications in high speed trains[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,30(4):675-683.
- [10] LI L,CHEN B. Frequency-modulated continuous-wave radio-over-fiber signal generation based on wavelength tunable laser[J]. Journal of Optoelectronics • Laser,2017,28(6):591-595.
李林,陈彪.利用可调谐激光器产生可调谐的连续波光载信号[J].光电子·激光,2017,28(6):591-595.
- [11] PU T,WANG W W. Study on the characteristic and application of DFB semiconductor lasers under optical injection for microwave photonics [C]//2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Optical Signal Processing. International Society for Optics and Photonics, October 28-30, 2017, Beijing, China. Washington: SPIE, 2018, 10617: 1061702.
- [12] 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.
- [13] ZENG Y T,ZHOU H,CHEN M,et al. Research on 60 GHz radio over fiber system based on 18-tuple frequency technology[J]. Journal of Optoelectronics • Laser,2019,30(7):704-711.
曾羽婷,周慧,陈明,等.基于18倍频技术的60GHz光载无线通信系统研究[J].光电子·激光,2019,30(7):704-711.
- [14] ISMAIL M M,OTHMAN M A,ZAKARIA Z,et al. EDFA-WDM optical network design system[J]. Procedia Engineering,2013,53:294-302.
- [15] COX C H,ACKERMAN E I,BETTS G E,et al. Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2006,54(2):906-920.
- [16] CAI X F,LV X M,LIAO A,et al. Four channel microwave photons electro-optical conversion module based on package integration[J]. Optical Communication Technology,2020,44(6):32-35.

蔡雪芳,吕晓萌,廖翱,等.基于封装集成的四通道微波光子电/光转换组件[J].光通信技术,2020,44(6):32-35.

- [17] LI C Y, AN J, ZHANG J S, et al. 4. 20 GHz silica-based AWG hybrid integrated receiver optical sub-assemblies [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(6): 060603.
- [18] 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.
- [19] LIU L, CHANG L M, KUANG Y X, et al. Low-cost hybrid

integrated 4×25 GBaud PAM-4 CWDM ROSA with a PLC-based arrayed waveguide grating de-multiplexer [J]. Photonics Research, 2019, 7(7): 722-727.

作者简介:

吕晓萌 (1986—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为光子信息技术,包含光电子芯片、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。