

微波光子收/发模块技术*

钱 广^{1,2,3**}, 钱 坤⁴, 何晓舟⁴, 王子彦⁴, 陈向飞³, 唐 杰^{1,2},
王琛全^{1,2}, 顾晓文^{1,2}, 孔月婵^{1,2}, 陈堂胜^{1,2}

(1. 南京电子器件研究所, 南京 210016; 2. 微波毫米波单片集成和模块电路重点实验室, 南京 210016; 3. 南京大学微结构国家实验室和现代工程与应用科学学院, 南京 210093; 4. 空军装备部上海局, 上海 200231)

摘 要: 微波光子收/发模块是微波光子系统中实现电光/光电转换等功能的核心部件, 在雷达、电子对抗及通信等系统中均具有广泛应用。文章介绍了微波光子收/发模块结构原理和典型产品, 论述了微波光子收/发模块未来发展趋势及关键技术。

关键词: 微波光子; 收/发模块; 光电集成

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)04-0241-07

Microwave Photonic Transmitter/Receiver (T/R)

QIAN Guang^{1,2,3}, QIAN Kun⁴, HE Xiaozhou⁴, WANG Ziyang⁴, CHEN Xiangfei³, TANG Jie^{1,2},
WANG Chenquan^{1,2}, GU Xiaowen, KONG Yuechan^{1,2}, CHEN Tangsheng^{1,2}

(1. *Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, CHN*; 2. *Science and Technology on Monolithic Integrated Circuits and Modules Laboratory, Nanjing 210016, CHN*; 3. *National Laboratory of Solid State Microstructures & College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, CHN*; 4. *The Shanghai Bureau of Air Force Equipment Department, Shanghai 200231, CHN*)

Abstract: Microwave photonic Transmitter/Receiver are core components for electro-optic (EO) / opto-electric (OE) conversions in the microwave photonic systems, and have been widely used in radar, electronic warfare, communication and etc. In this paper, the principle and typical products of microwave photonic Transmitter/Receiver (T/R) were introduced, and the development trend and key technologies were discussed.

Key words: microwave photonics; transmitter/receiver; opto-electric integration

引 言

微波光子技术是兼具微波、光电子两门学科特点

的新兴学科交叉技术, 具备超宽带、信号并行处理、低损耗光纤传输、抗电磁干扰等优势, 在电子对抗、雷达、射频光纤拉远传输等领域具有广泛应用, 也为多

收稿日期: 2022-10-27

* 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2802702); 江苏省产业前瞻技术研发项目(BE2021030)

作者简介: 钱 广(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事微波光电子集成芯片及模块技术研究; (E-mail: chinaqll@163.com)

唐 杰(1990—), 男, 工程师, 主要从事微波光电子集成模块技术研究;

王琛全(1993—), 男, 工程师, 主要从事微波光电子集成模块技术研究。

** 通讯作者

功能一体化电子信息设备发展带来了希望。

微波光子收/发模块是微波光子系统中实现电光/光电转换等功能的核心部件,对微波光子链路噪声系数、动态范围、增益等性能具有重要影响。接收/发功能可分为单收、单发和收/发一体三种;按调制类型可分为:直接调制型(即:发射模块采用直调激光器方案)、外调制型(即:发射模块采用激光器、电光调制器组合方案);按照结构类型可分为:含射频放大型(即:在发射模块的电光调制器前级增加微波低噪声放大器(LNA),在接收模块的光电探测器后级增加微波功率放大器(PA))和不含射频放大型。

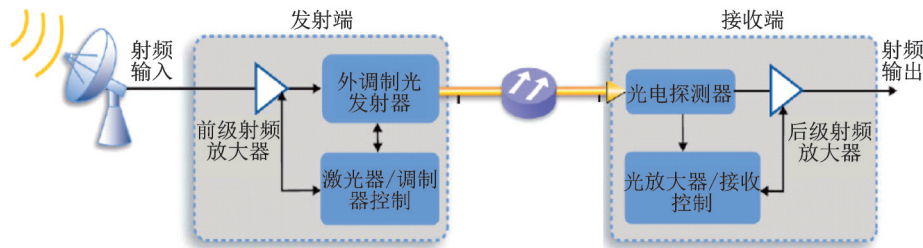


图1 典型外调制微波光子收/发链路结构图

Fig.1 Structure of typical external modulated microwave photonic link

微波光子收/发链路主要性能参数包括:链路增益、噪声系数和无杂散动态范围等。外调制型本征微波光子收/发链路的上述性能参数可表示如下。

1.1 链路增益

设微波光子链路的输入信号功率为 P_{in} ,输出信号功率为 P_{load} ,则链路增益 g_i 为:

$$g_i = \frac{P_{load}}{P_{in}} \quad (1)$$

提高链路增益的途径有:降低光传输损耗、降低调制器半波电压、提高光电探测器响应度、增大光功率等。

1.2 噪声系数

噪声系数(Noise Figure, NF)定义为实际输出噪声功率与理想输出噪声功率的比值,可表示为:

$$NF = 10 \lg \left[1 + \frac{1}{g_i} + \frac{r_{in} I_{av}^2 R_{load}}{g_i k T} + \frac{2q I_{av} R_{load}}{g_i k T} \right] \quad (2)$$

式中, r_{in} 为相对强度噪声, I_{av} 为平均光电流, R_{load} 为负载电阻, q 为电子电荷, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度。降低链路噪声系数的途径有:降低激光器相对强度噪声、降低平均光电流、提高链路增益等。

文章介绍了微波光子收/发模块的基本类型及国外主要产品技术的进展,并展望了未来发展趋势。

1 微波光子收/发模块结构原理

图1所示为典型的外调制、含射频放大型微波光子收/发链路结构模型,发射端主要由激光器、电光调制器、前级射频放大及光电控制电路等组成,接收端主要由光电探测器、后级射频放大及光电控制电路等组成。本征微波光子收/发链路中不含前级射频放大和后级射频放大。

1.3 无杂散动态范围

无杂散动态范围(Spurious Free Dynamic Range, SFDR)定义为当三阶交调功率与器件噪声功率相等时,三阶截断点与噪声功率之比,即:

$$SFDR = \frac{2}{3}(IP_3 - N_0) = \frac{2}{3}(IP_3 - NF + 174) \quad (3)$$

提高链路无杂散动态范围的途径相似于降低噪声系数,尤其降低激光器相对强度噪声对提高链路无杂散动态范围效果最为明显。

2 微波光子收/发模块典型产品

目前,微波光子T/R模块产品厂家主要集中在美国,典型公司例如: Microwave Photonic Systems公司、Photonic Systems公司、Emcore公司等,均已具备成熟的微波光子收/发模块产品体系,种类繁多,在电子战、相控阵雷达、远程分布式天线、宽带射频光纤传输等领域均已得到广泛应用。

2.1 Microwave Photonic Systems公司

Microwave Photonic Systems(MPS)公司是一家专门从事射频光子组件、射频组件、光纤组件和子系统设计、开发和制造的高科技公司,相关产品应用领域覆盖宽带电信、卫星通信、国防、公共安全

等。MPS公司长期为美国军事机构、国防承包商、研究部门和商业客户提供专有技术解决方案,相关产品支持多种空军、陆军和海军任务的关键型号项目,主要包括:雷达、电子战、拖曳声纳阵列、UHF卫星通信地面站、车载GPS天线链路和车载光纤数据及多路复用系统(FODMS)等。



图2 美国MPS公司微波光子收/发模块产品应用领域展示
Fig.2 Application fields of microwave photonic Transmitter/Receiver of Microwave Photonic Systems, Inc.

MPS公司微波光子收/发模块产品种类有30余种,工作频率覆盖70 GHz内多个带宽类型,如:2.25 GHz(如型号:MP-2300Tx)、3 GHz(如型号:MP-2300TRx) 3.5 GHz(如型号:MP-2300Tx/Rx、MP-2350Tx/Rx)、6 GHz(如型号:MP-8021)、12 GHz(如型号:MP-5000Tx/Rx)、18 GHz(如型号:MP-6000Tx/Rx)、22 GHz(如型号:MP-8001-22)、24 GHz(如型号:MP-7000Tx/Rx)、40 GHz(如型号:MP-8000-40、MP-8001-40)、60 GHz(如型号:MP-8000-60)、70 GHz(如型号MP-8001-70)等。其中,70 GHz微波光子收/发模块代表性产品如图3所示。

接收发功能可分为单收、单发和收/发一体三种类型,其中单收类型产品如MP-***Rx、单发类型产品如MP-***Tx、收/发一体类型产品如:MP-2300TRx、MP4235TRx、MP-8021。直接调制型微波光子收/发模块产品如型号:MP-2300Tx、MP-2300TRx、MP-2300Tx、MP-2350Tx、MP4235TRx、MP-5000Tx、MP-6000Tx、MP-7000Tx。外调制型微波光子收/发模块产品采用激光器、铌酸锂电光调制器组合方案,如型号:MP-8001-22Tx(采用Z切铌酸锂电光调制器)、MP-8001-40Tx(采用Z切铌酸锂电光调制器)、MP-8000-22Tx(采用X切铌



图3 美国MPS公司70GHz超宽带微波光子收/发模块(型号:MP-8001-70-UTX/RX)

Fig.3 70 GHz ultrawide band microwave photonic Transmitter/Receiver of Microwave Photonic Systems, Inc. (Model: MP-8001-70-UTX/RX)

酸锂电光调制器)、MP-8000-40Tx(采用X切铌酸锂电光调制器)、MP-8000-60Tx(采用Z切铌酸锂电光调制器)。其中,收/发一体型微波光子模块产品如图4所示。

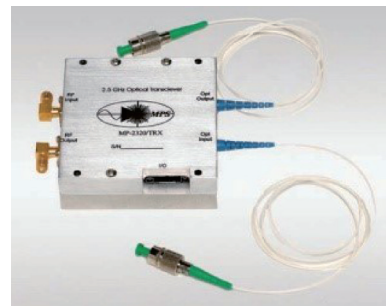


图4 美国MPS公司微波光子收/发一体模块产品(型号:MP2320TRx)

Fig.4 Microwave Photonic Transceiver of Microwave Photonic Systems, Inc.(Model: MP2320TRx)

为了提高微波光子链路增益,通常会在发射模块的电光调制器前级增加微波低噪声放大器(LNA)、在接收模块的光电探测器后级增加微波功率放大器(PA),如型号:MP-8001-22Tx(Amplified)、MP-8001-40Tx(Amplified)、MP-8000-22Tx(Amplified)、MP-8000-40Tx(Amplified))等。其中,含射频放大型微波光子收/发模块代表性产品如图5所示。

微波光子系统小型化、轻量化、阵列化发展需求使得尺寸、重量和功率(SWaP)已成为系统设计中的关键因素,超紧凑集成已是微波光子收/发模块的必要需求。在超紧凑产品方面,美国MPS公司最近推出了超紧凑26.5 GHz微波光子收/发模块产品(如图6所示),并将这种超紧凑封装结构模式应用于传统MP-2320、MP-5000和MP-6000系列产品的更新升级。近期还推出了0.1~3.5 GHz超

紧凑微波光子收/发模块产品,如图7所示。

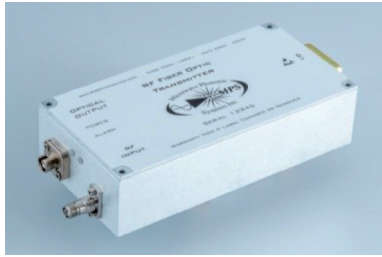


图5 美国MPS公司40 GHz含射频放大、外调制微波光子发射模块产品(型号:MP-8000-40Tx)

Fig.5 40 GHz microwave photonic Transmitter/Receiver with RF amplification and external modulation of Microwave Photonic Systems, Inc. (Model: MP-8000-40Tx)



图6 美国MPS公司新型超紧凑26.5GHz RF光子收/发模块产品(型号:UCT/UCR)

Fig.6 Ultra compact 26.5 GHz RF photonic Transmitter/Receiver of Microwave Photonic Systems, Inc.(Model: UCT/UCR)



图7 0.1 to 3.5 GHz 微波光子收/发模块(型号:MP-128TX/RX)

Fig.7 0.1 to 3.5 GHz microwave photonic Transmitter/Receiver of Microwave Photonic Systems, Inc.(Model: MP-128TX/RX)

2.2 Photonic Systems公司

Photonic Systems(PS)公司在射频和光子器件及系统方面具有多类产品,目前可提供全面的微波光子学研究、工程服务和产品,已为美国国防、通信、射电天文学等领域的应用客户提供微波光子解决方案。



图8 PS公司微波光子产品应用领域展示

Fig.8 Application fields of microwave photonic Transmitter/Receiver of Photonic Systems, Inc.

目前PS公司产品主要包含4类:射频前端、射频光子收/发传输模块、调制器及调制器偏置点控制器。其中,射频光子收/发传输模块产品主要包含PSI-1600-10L、PSI-1600-20L、PSI-2600-20L、PSI-3600L几个系列。



图9 美国PS公司PSI-1600-10L系列微波光子收/发模块产品

Fig.9 PSI-1600-10L series microwave photonic Transmitter/Receiver of Photonic Systems, Inc.

其中,PSI-1600-10L系列又分为PSI-1601-10L(发射、接收均不加射频放大)、PSI-1602-10L(发射加射频放大、接收不加射频放大)、PSI-1603-10L(发射不加射频放大、接收加射频放大)、PSI-1604-10L(发射、接收均加射频放大)四种类型。PSI-1600-10L系列性能如表1所示。

PSI-1600-20L系列是PSI-1600-10L系列的带宽扩展,工作带宽从12 GHz提升到了20 GHz,也分为PSI-1601-20L、PSI-1602-20L、PSI-1603-20L、PSI-1604-20L四种类型。PSI-2600-20L系列工作带宽为20 GHz,分为PSI-2601-20L、PSI-2602-20L、

表1 PS公司 PSI-1600-10L 系列微波光子收/发模块产品性能参数

Tab.1 Performance of PSI-1600-10L Series microwave photonic Transmitter/Receiver of Photonic Systems, Inc.

型号 参数	PSI- 1601	PSI- 1602	PSI- 1603	PSI- 1604
工作带宽/GHz	0.045~12	0.1~12	0.1~12	0.1~12
链路增益/dB	-32	0	0	32
噪声系数/dB	43	12	43	13
输入IP3/dBm	20	-13	19	-14
SFDR/(dB·Hz ^{-2/3})	101	100	100	99
平坦度/dB	±3	±3	±3	±4
任意100 MHz/dB	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5

PSI-2603-20L、PSI-2604-20L 四 种 类 型 。
PSI-1600-20L、PSI-2600-20L 系 列 特 点 如 表 2
所示。

表2 PS公司 PSI-1600-20L、PSI-2600-20L 系列微波光子收/发模块产品特点

Tab.2 Characteristics of the PSI-1600-20L and PSI-2600-20L Series microwave photonic Transmitter/Receiver of Photonic Systems, Inc.

型号	特征
PSI-1601/2601-20L	发射、接收均不加射频放大
PSI-1602/2602-20L	发射加射频放大,接收不加射频放大
PSI-1603/2603-20L	发射不加射频放大,接收加射频放大
PSI-1604/2604-20L	发射、接收均加射频放大

与 PSI-1600 系列相比,PSI-2600 系列在发射模块中通过使用铌酸锂(LiNbO₃)马赫-增德尔电光调制器,明显提高了微波光子收/发模块的动态范围、降低了噪声系数,PSI-2600-20L 系列性能如表 3 所示。

针对 PSI-3600 系列,目前 PSI 公司仅推出 PSI-3601-20NL 一个型号。PSI-3601-20NL 是一套 20 GHz 无射频放大高性能微波光子链路模块,其基本特征与 PSI-1601-20L、PSI-2601-20L 相似,工作带宽 20 GHz。但与 PSI-2601 相比,PSI-3601-20NL 本征链路的 SFDR 性能为 115 dB/Hz^{2/3},达创纪录水平。

随着微波光子系统对带宽性能需求的不断提升,PSI 公司最近又推出了一款工作带宽可达到 110 GHz 的 PSI-2601-110L 产品,前后级均不加射频放大。

表2 PS公司 PSI-2600-20L 系列微波光子收/发模块产品性能参数

Tab.3 Performance of PSI-2600-20L Series microwave photonic Transmitter/Receiver of Photonic Systems, Inc.

型号 参数	PSI- 2601	PSI- 2602	PSI- 2603	PSI- 2604
工作带宽/GHz	0.045~20	0.1~20	0.1~20	0.1~20
链路增益/dB	-20	13	12	44
噪声系数/dB	32	4	32	5
输入IP3/dBm	22	-11	15	-19
SFDR/(dB·Hz ^{-2/3})	110	106	105	100
平坦度/dB	±5	±5	±5	±6
任意100 MHz/dB	±0.5	±0.5	±0.5	±0.5

2.3 Emcore 公司

Emcore 公司是美国先进光学及 MEMS 产品的知名供应商,长期为美国先进的航空航天、国防和宽带通信领域提供了广泛的解决方案。军用光电子是该公司两大核心业务之一,在导航和惯性传感、国防光电、有线电视和光纤到户(FTTP)网络、5G 无线和分布式天线系统(DAS)、电信和数据中心和卫星通信等领域有广泛应用。

微波光子收/发模块产品是 Emcore 公司的核心产品,主要应用于军用射频光纤传输系统、电子战系统、分布式雷达天线拉远和民用通信等领域。图 10 为 Emcore 公司微波光子收/发模块产品在雷达领域的应用构架示意图,其中黄色线条代表光信号传输路线,蓝色线条代表射频信号传输路线。可以看出,基于光信号的射频传输与处理已占据雷达系统的大部分,仅存天线前端用射频电缆传输,微波光子技术在美国雷达系统中已经成熟应用。

目前,Emcore 公司拥有 20 GHz、40 GHz、60 GHz 一系列 30 余种产品,典型产品如:5021T 3 GHz、7 GHz、13 GHz、18 GHz、22 GHz 发射模块系列,5021TR 3 GHz、7 GHz、13 GHz、18 GHz、22 GHz 收/发一体模块系列,SITU 13 GHz、18 GHz、22 GHz、40 GHz 收/发分立模块系列,OTS-2 18 GHz、22 GHz、40 GHz、60 GHz 收/发分立模块系列。其中,5021T、5021TR 系列采用直调激光器方案,工作频率最高到 20 GHz 左右;SITU、OTS-2 系列采用外调制方案,工作频率覆盖 40 GHz,最高可达 60 GHz。

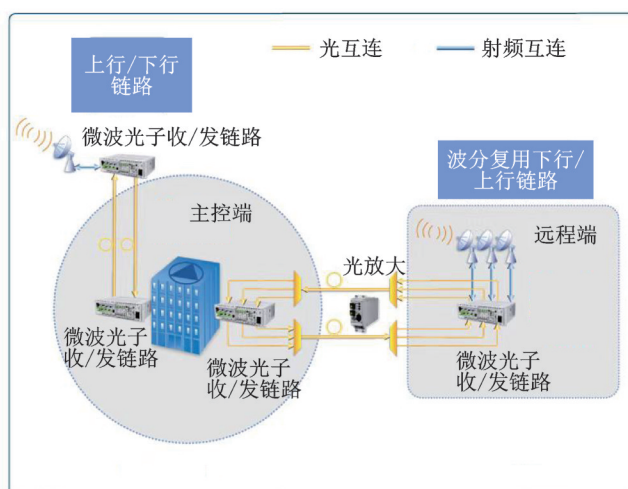


图 10 Emcore 公司微波光子收/发模块产品雷达应用构架示意图

Fig.10 Radar application framework of microwave photonic Transmitter/Receiver of Emcore, Inc.



图 11 Emcore 公司 C/X 波段收/发一体型微波光子收/发模块(型号:MAKO-X C/X)

Fig.11 MAKO-X C/X-Band RF Over Fiber Transceiver of Emcore, Inc.



图 12 Emcore 公司直接调制型微波光子收/发模块(型号: 5021TR 系列)

Fig.12 5021 TR Series DFB Transceivers of Emcore, Inc.

3 微波光子收/发模块未来发展趋势及关键技术

随着微波光子装备发展需求的不断提升,光电集成化、芯片化、小型化已成为微波光子收/发模块的发展趋势和迫切需求。图 14 为 2012 年西班牙 J. Capmany 等提出的集成微波光子收/发前端的构想。该芯片主要包含:激光光源、可重构光信号处

理系统、电光调制器、光耦合器、可重构光滤波器、光电探测器、射频放大器、滤波器、射频开关等器件结构。该构想为集成微波光子收/发模块的发展提供了发展框架。

随着微波光子芯片技术、集成技术的发展,芯片集成化的微波光子收/发模块必将实现。为了实现这种集成化微波光子收/发芯片,需重点突破以下几项关键技术:

(1)低损耗集成光波导及放大技术。集成光波导是集成微波光子芯片中光信号的传输路径,其损耗直接影响微波光子收/发链路的链路增益、噪声系数和动态范围等参数。集成光波导的损耗来源主要包括:波导材料的吸收损耗、波导散射损耗和弯曲损耗,在材料、弯曲半径优化的情况下,需要重点解决集成光波导的刻蚀工艺。另外,为了降低光传输过程中的功率损耗,也可以在片上光传输过程中引入片上光放大器,对光信号损耗进行补偿。针对片上光放大技术,常用方法有 SOA、PPLN、掺杂等,需要重点解决其高增益、低噪声等问题。

(2)异质光子集成技术。与射频芯片相比,光子芯片的材料体系更加复杂多样,不同材料体系具有不同的器件优势,例如:磷化铟(InP)是目前实现高性能激光器、光电探测器的最佳材料体系;铌酸锂是目前商用电光调制器最成熟的解决方案;氮化硅(SiN)、二氧化硅(SiO₂)具有超低光损耗优势,是目前实现无源光芯片和大规模传输光路的有效介质等。因此,目前集成光子芯片领域还没有一种“万能材料”,可以实现各种最佳性能的光子芯片。异质光子集成技术可以发挥不同材料体系优势,将不同材料体系最佳性能器件集成到同一芯片上,是

实现大规模光子集成的有效技术手段。目前常用异质光子集成方法有:晶圆级外延层转移、印章微转印等。

(3)高效电光/光电转换技术。在微波光子收/发链路中,实现电光/光电转换功能的器件有直调激光器、电光调制器和光电探测器,是系统中微波信号和光信号相互转换的接口器件。电光调制器的插损、带宽、半波电压、消光比等参数和光电探测器的带宽、响应度、饱和光功率等参数对微波光子链路增益、噪声系数和动态范围等都具有重要影响,因此必须研制高效率电光/光电转换器件。另外,在保证电光调制器、光电探测器高性能参数的同时,还需尽可能缩小器件尺寸,以提高集成度,满足小型化需求。

(4)射频-光子异质/异构集成技术。在微波光子收/发模块中,除了有光子集成芯片,还需要有射频低噪声放大器、功率放大器、开关等固态微波芯片。目前,常用固态微波芯片材料为GaAs、GaN、

InP等,与光子集成芯片常用材料体系有明显区别,因此很难在同一材料平台上实现微波-光子集成,需要异质/异构集成手段实现射频器件和光子器件的同片集成。目前常用射频-光子集成方法有:金属化通孔、金属微凸点键合、植球等。针对射频-光子异质/异构集成,需重点解决其中光、电、热多物理场设计、串扰抑制及核心工艺等问题。

(5)微波光子混合封装技术。在微波光子收/发模块(尤其阵列化模块)中,通常需要集成大量的光子器件、射频器件甚至控制电路等,接口涉及光接口、射频接口、直流引脚或J30接口等。因此,需要合理设计微波光子混合封装空间布局,抑制射频串扰的同时,压缩体积。另外,为了满足小型化封装需求,还需要研制小型化控制电路。针对特殊环境应用需求,还需要考虑气密封装及抗振等。针对微波光子收/发模块封装,由于其中涉及光、射频、控制电路等多种不同器件的微组装,在封装过程中需要充分考虑各个组装工艺的焊料选取及温度梯度匹配等。

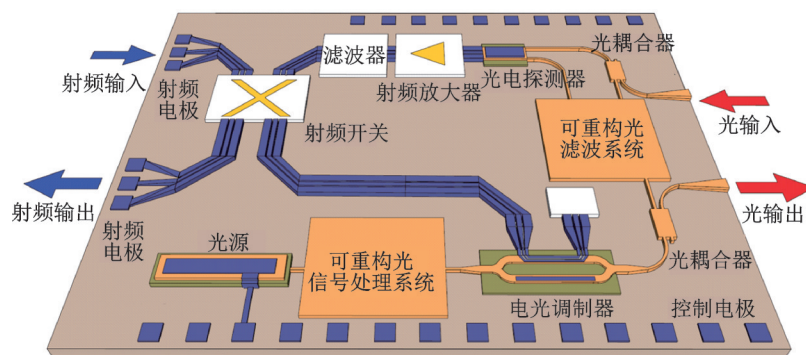


图13 集成微波光子收/发前端芯片框架

Fig.13 Schematic of integrated microwave photonic Transmitter/Receiver

4 总结

文章综述了微波光子收/发模块的基本类型及国外主要产品技术的进展,并介绍了未来的发展趋势及需要解决的关键技术问题。微波光子收/发模块是微波光子系统中实现电光/光电转换等功能的核心部件,其关键技术在于芯片。随着激光器、电光调制器、光电探测器、光信号传输及处理、异质光子集成等核心芯片技术的不断突破,微波光子收/发模块的应用领域及规模都将得到飞速扩展。

参考文献

[1] Li Jiachen, Yang Sigang, Chen Hongwei, et al. Fully integrated hybrid microwave photonic receiver [J]. Photonics Re-

search, 2022, 10(6): 1472-1483.

- [2] 尹纯静. 面向一体化电子系统应用的宽带通用射频光前端技术[D].北京:北京邮电大学, 2019.
- [3] 张业斌, 王凯, 田朝晖. 基于微波光子收发共用真时延网络的相控阵波束合成[J]. 半导体光电, 2022, 43(3): 609-612.
- [4] 邹喜华, 李沛轩, 刘丰玮. 智能微波光子射频前端与链路[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(2): 20-27.
- [5] High performance rf fiber-optic links [EB/OL]. http://www.photonicsinc.com/fiber_optics.html, 2022.11.20.
- [6] Microwave Photonic transmitters/ receivers [EB/OL]. https://emcore.com/product-category/defense-optoelectronics/microwave-transmitters-receivers/#products_main_ct, 2022.11.20.
- [7] RF Optical Link Modules [EB/OL]. <https://www.b2bphotonics.com/products/optical-link-modules/>, 2022.11.20.
- [8] Ultra Compact 26.5 GHz RF Photonic Transmitter and Receiver [EB/OL]. <https://www.b2bphotonics.com/ultra-compact-26-5-ghz-rf-photonic-transmitter-and-receiver/>, 2022.11.20.