

集成可编程光芯片的研究与功能验证

李智慧, 梁宇鑫, 范诗佳, 廖海军, 刘大鹏, 冯 靖, 崔乃迪*

(联合微电子中心有限责任公司硅基光电子中心, 重庆 401332)

摘要: 随着对高速、超紧凑数据信号管理需求的日益增长, 光子集成电路(Photonics Integrated Circuits, PIC)在先进的光子信号处理中受到广泛关注, 其中可编程光芯片因其特有的通用性、可重构特性逐渐受到开发者的青睐. 本文依托联合微电子中心有限责任公司(United MicroElectronics Center Co. Ltd, CUMEC)的绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)自主工艺平台, 设计并制备了包含9个六边形单元的3×3六边形架构可编程光芯片, 利用迭代扫描法实现了消光比高达30 dB的开关电压标定, 并通过扁平化版图优化设计使芯片尺寸降低了21%; 采用此可编程光芯片进一步完成了典型功能验证: 通过对输入输出端的可调基本单元(Tunable Basic Unit, TBU)耦合系数进行调谐, 可实现消光比、谐振波长、自由光谱范围可调的马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)/微环谐振腔(Micro-Ring Resonator, MRR), 消光比可高达42.3 dB/28 dB; 可实现延时量大范围可调谐的延时线及任意输入/输出端口之间的路由. 该芯片是目前世界上规模最大的六边形架构可编程光芯片, 并实现了与有源单元的单片集成, 在微波光子信号处理、化学生物传感、量子信息、光计算领域具有广阔的应用前景.

关键词: 光子集成电路; 可编程光芯片; 可重构; 硅光平台; 功能验证

基金项目: 国家重点研发计划(No.2022YFB2802703); 国家自然科学基金(No.62105051)

中图分类号: TN256; TN252 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)05-1524-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221398

Research and Functional Verification of Integrated Programmable Photonic Chips

LI Zhi-hui, LIANG Yu-xin, FAN Shi-jia, LIAO Hai-jun, LIU Da-peng, FENG Jing, CUI Nai-di*

(Silicon Photonics Center, United Microelectronics Center Co., Ltd, Chongqing 401332, China)

Abstract: With the increasing demand for high-speed, ultra-compact data signal management, photonics integrated circuits (PIC) have attracted extensive attention in advanced photonic signal processing. Programmable photonic chips are gradually becoming favored by developers for their inherent generic and reconfigurable features. Based on United Microelectronics Center Co., Ltd (CUMEC) silicon-on-insulator (SOI) integrated photonics platform, we have designed and fabricated a 3×3 hexagon-shape programmable photonic chip containing 9 hexagon units. The optical switch's extinction ratio of up to 30 dB was achieved by the "Iteration Scanning Method", and there is a 21% chip size reduction through "Flattening" layout optimization. The typical functions of this programmable chip are further verified by tuning the input/output coupling coefficients of tunable basic unit (TBU). This allows for a Mach-Zehnder interferometer (MZI) or a micro-ring resonator (MRR) with a tunable extinction ratio, resonance wavelength and free spectra range to be realized, and the corresponding extinction ratio can reach 42.3 dB and 28 dB, respectively. Other functions, such as an optical delay line with a wide tunable range, as well as routing between any input and output ports, are also successfully realized with this programmable photonic chip. This is the largest scale hexagon-shape programmable chip which could be integrated with active devices. This chip offers a wide range of potential applications, in the areas of microwave photonics signal processing, bio-chemical sensing, quantum information and optical computing.

Key words: photonics integrated circuits; programmable photonic chip; reconfigurable; silicon-photonics platform; functional verification

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2802703); National Natural Science Foundation of China (No.62105051)

1 引言

在过去的十几年里,光子集成电路^[1-3](Photonics Integrated Circuits, PIC)在光互连、传感、光计算、光子人工智能(Artificial Intelligence, AI)等领域得到快速的发展。如今,绝大多数的光子集成芯片是为实现某种特定的功能而设计,如光波分复用/解复用器、光谱仪、光收发器,这类仅能实现单一功能的光芯片称作定制化光子集成芯片(Application-Specific Photonic Integrated Circuits, ASPIC)。随着光学处理器逐渐迈向小型化、规模化、多功能化,具有通用化设计的可编程光芯片^[4-6]得到越来越多研究人员的关注。可编程光芯片通过对通用的光学硬件结构进行适当的编程,可以实现滤波、路由、功分、延时等多种功能,具有高度的通用性和可重构能力。与目前业界主流的 ASPIC 相比,大幅减少了设计和制作的迭代周期,显著提高了设计研发效率及生产效率;同时,可编程光芯片内部有丰富的可调基本单元(Tunable Basic Unit, TBU)和输入/输出(Input/Output, I/O)引脚,设计上有大量的冗余,稳定性更高,这将极大地拓宽光电集成领域的产品,催生全新的产品方向。

可编程光芯片的研究最早可以溯源到 1994 年因斯布鲁克大学的 Reck 等人^[7]提出的使用分束器、移相器、反射镜构成的三角形光网络,该结构实现了利用光学器件在实验室中构造任意离散有限维度的酉算子的算法;随后斯坦福大学的 Miller^[8]对三角构型的可编程光网络进行了进一步的研究,实现了输入输出端口之间的任意线性功能和耦合;2016 年, Clements 等人^[9]使用四边形网格结构对通用性多端口干涉仪进行了优化,光学深度、鲁棒性等性能得到了有效的提升;以上结构中,网络中的光路只能前向传输,无法实现信号的反馈,统称为前向传输可编程光网络;与此对应的是可实现信号反馈的前后向传输可编程光网络。2015 年, Zhuang 等人^[10]提出了氮化硅四边形架构的可编程光学信号处理器,实现了拓扑矩形网络在光学信号处理的首次应用;受到四边形架构的启发,西班牙瓦伦西亚理工大学 Capmany 在 2016 年提出了三角形和六边形结构的可编程光芯片架构^[11],并在 2017 年设计出了基于绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)平台的具有 7 个六边形单元的可编程光网络芯片,阐述了其在通信、化学生物传感、量子信息等领域多达 20 种的应用,充分论证了可编程光芯片的通用性和可重构性^[12];国内华中科技大学的王健课题组于 2020 年发表了 SOI 平台上的包含 4 个六边形单元的六边形架构可编程光芯片,实现

了微环、马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)、光延时线、多端口路由、 $N \times N$ 光开关等多种功能^[13]。除了架构研究外,研究者们对网络中的路径配置算法进行了探索,2019 年,比利时根特大学的 Wim 课题组开发了一种可编程光子网络中用于寻路算法的图形表示方法^[14];同年, Campany 等人提出了一种基于数学归纳法的分析方法,可实现任意数目、任意网格架构条件下的任意散射矩阵^[15]。

可编程光芯片作为一种通用性产品,是目前光子集成领域的尖端热点技术,旨在像 FPGA(Field Programmable Gate Array, FPGA)一样快速推动光子集成产业的快速发展。为了实现类似 FPGA 在集成电路(Integrated Circuits, IC)领域的地位及作用,可编程光芯片的发展离不开网络规模的扩大、精确的基础单元开关控制及成熟的自主工艺开发,以及基于以上技术实现的高性能可编程器件。近些年来可编程光芯片取得了一些瞩目的进展,但是仍然处于概念提出阶段,对上述关键技术的研究尚不完善,制约了可编程光芯片的开发与迭代。本文依托联合微电子中心有限责任公司(United Microelectronics Center Co. Ltd, CUMEC)的 SOI 自主工艺硅光平台,完成了包含 9 个单元的六边形架构可编程光芯片的设计和制备。通过扁平化版图布局优化和迭代扫描标定实现了大规模光网络集成度的提升及 TBU 开关电压的精确标定;成功实现了自由光谱范围、谐振波长、消光比可调的微环和 MZI,延时量大范围可调的延时线及任意输入/输出端口之间的路由。该芯片是目前国际上最大规模的六边形架构可编程光芯片,并且实现与有源单元的单片集成,为片上微波光子功能(微波光子信号滤波、光学真延时、模拟光计算、光波分复用系统等)的实现提供了可能。

2 基本原理

和前向传输网络相比,可实现信号反馈的前后向传输网络由于具备更高的传输自由度受到广泛的关注。图 1 为前后向传输的六边形、三角形、四边形可编程网络架构的示意图, Daniel Pérez 等人^[16]对 3 种架构的一系列性能参数进行了对比,其中四边形架构的复制比最高,并且在构建微环时具有最大的自由光谱范围(Free Spectra Range, FSR),可用于实现大带宽的模拟信号运算^[17];而六边形架构在重构性、串扰以及面积利用率等指标方面表现优异,被认为是最适合的可编程光网络架构。

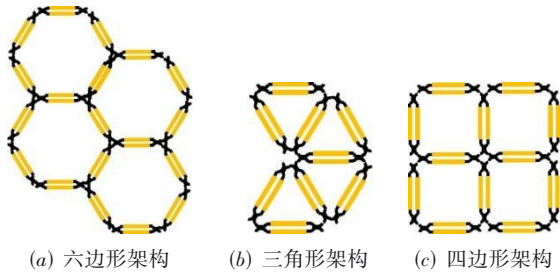


图1 可编程光芯片架构示意图

可编程光芯片的基本组成单元称为TBU. 理论上任何可调光耦合器都可以作为TBU, 但是本文中只考虑图2(a)所示的基于热光效应的等臂MZI. 其传输矩阵可以表示为

$$\text{TBU} = e^{i\Delta} \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \gamma \quad (1)$$

其中, $\theta = (\phi_U - \phi_L)/2$; $\Delta = (\phi_U + \phi_L)/2$; ϕ_U 和 ϕ_L 表示上下两臂由于热光效应引起的相位变化; γ 代表TBU的插入损耗. 由式(1)可知, 它可以提供独立的分光比调谐和相位响应, 对光路传输和相位进行控制. 通过控制上下臂的相位差, TBU可以分别工作在“直通(Bar)”“交叉(Cross)”“可调耦合器(Tunable Coupler, TC)”3种状态, 如图2(b)所示.

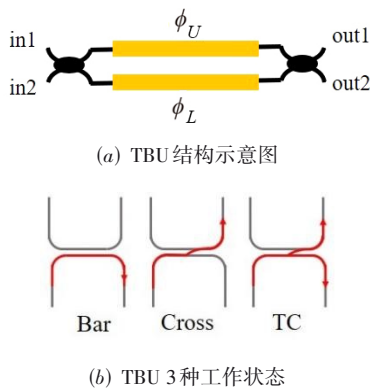


图2 TBU示意图

可编程光芯片的可编程、可重构特性是通过构成大规模网络拓扑结构的TBU进行以上3种形式的状态编程来实现的, 图3展示了在同一块六边形架构芯片上实现多种基本结构的示意图, 包括光路由(图3(c))、光延时线(图3(d)), 这两种结构中, 所有TBU只作为一个具有缓存或插损特性的双端口波导, 仅仅工作在Bar或者Cross状态; 也可以实现微环(图3(a)和(b))、MZI(图3(e))、微环辅助MZI(图3(f)). 以上3种结构中, 部分TBU工作在TC状态, 通过耦合参数的调谐, 实现器件的性能参数的调控, 如控制微环的耦合参数, 可以使微环分别工作在欠耦合、临界耦合、过耦合状态, 从

而对通过直通端的信号相位进行调节; 调节MZI输入输出端的耦合参数, 可以使其消光比实现大范围的优化. 与ASPIC相比, 可编程光芯片具有高度的灵活性, 一方面可以补偿由于工艺偏差导致的性能劣化, 另一方面可以根据实时需求进行性能参数的实时切换.

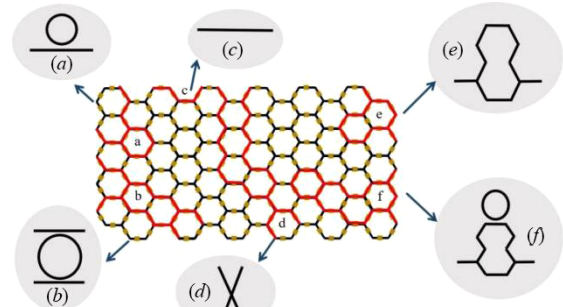


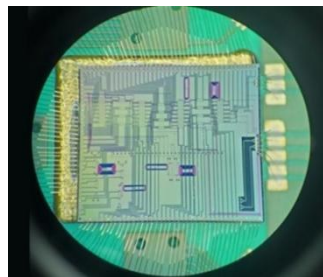
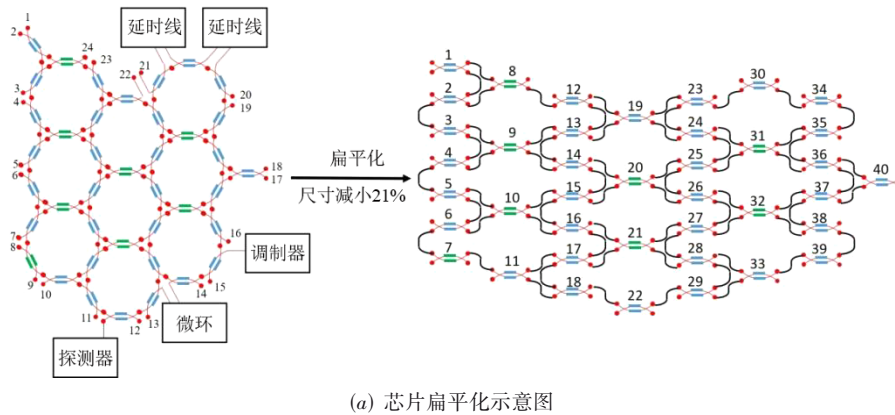
图3 可编程光芯片功能实现示意图

3 制备和测试

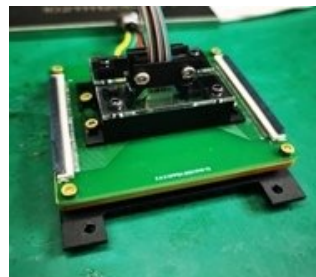
3.1 制备和封装

本文中设计并制备了图4(a)(左图数字为光I/O端口的编号, 右图数字为TBU的编号)所示的芯片, 包含3x3六边形架构可编程光芯片及与之相连的有源/无源单元. 可编程部分包含9个六边形单元, TBU总数为40, 每个TBU的两个臂上均放置加热电极, 因此电极总数为80; 其中蓝色TBU代表单臂加热, 仅能控制光路的传播方向; 绿色TBU代表双臂加热, 既可控制光的传播方向, 也可改变光的相位(0~2 pi). 该芯片共包含8个双臂加热的TBU, 因此实际工作的加热电极数量最多为48; 有源/无源单元为CUMEC自主研制的硅基调制器、探测器、微环、延迟线等器件. 为了提高芯片的集成度和器件的一致性, 版图设计时对该芯片进行了“扁平化”处理, 即将所有的TBU旋转至水平方向, 如图4(a)右图所示, (结构示意图和扁平化示意图的相对尺寸并非实际尺寸), 可编程部分芯片大小为5.25 mm x 1 mm, 尺寸减小了约21%, 提高了芯片的集成度. 依托CUMEC的SOI自主工艺平台, 采用8英寸SOI衬底(芯层硅厚220 nm, 下包层厚2 μm), 通过硅刻蚀、离子注入、硅基锗外延、金属化、化学机械研磨(Chemical Mechanical Polishing, CMP)等工艺完成芯片的制备, SOI波导最小线宽达到130 nm. 利用金属引线键合技术, 将片上金属电极与片外电控板相连, 通过FPGA实现电压配置和反馈数据, 并利用上位机配置实时实现最优协同算法与协同控制. 制备的芯片及封装后的模块分别如图4(b)和(c)所示.

图5为实验测试系统框图, 对TBU的性能进行测试时, 将扫谱激光器(KEYSIGHT-N7776C, 波长扫描范围为



(b) 芯片显微镜图



(c) 封装模块

图4 3×3 可编程光芯片

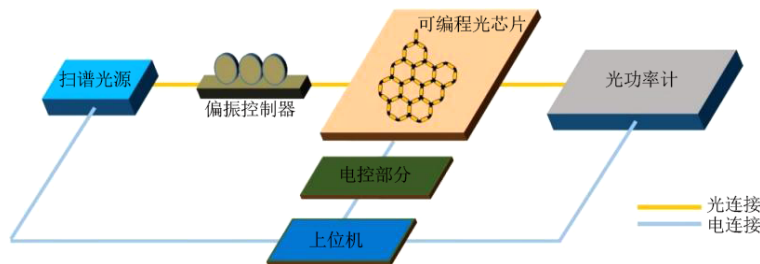


图5 测试系统框图

1 490~1 640 nm)的输出波长设置在 1 550 nm,经由三环式偏振控制器调节输出光的偏振态后,垂直耦合进入可编程光芯片. 通过上位机控制芯片的电控部分,对可编程光芯片进行 TBU 的损耗、开关电压、延时等测试结构的重构,从芯片输出的信号耦合到光功率计(KEYSIGHT-N7744C)实现参数测量;通过 TBU 编程实现高性能的光谱可调节器件时,扫谱激光器工作在扫谱状态,最后通过输出的光谱图获取微环、MZI 的消光比等性能.

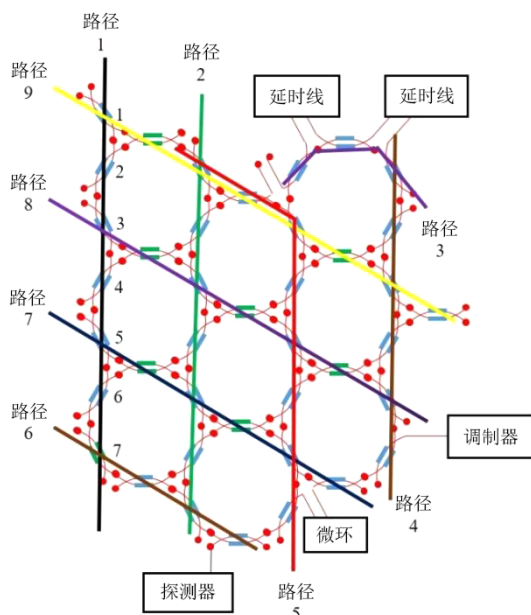
3.2 高性能可编程器件实现

3.2.1 光开关高精度标定

可编程光芯片由大量的 TBU 通过特定的拓扑形状组合而成,对其进行精确的开关电压标定是实现高性能的可编程、可重构器件的基础,因此获得每个 TBU 的电压曲线至关重要. 为此,开发了“迭代扫描法”对 TBU 开关电压进行标定^[18],如图 6 所示. 先进行标定路线的规划,确保标定路径覆盖网格中所有的 TBU,共包含 9

条标定路径,且部分 TBU 同时出现在 2 条不同的标定路径中;然后对每条路径中的 TBU 进行开关电压的标定,以路径 1 为例,对首个 TBU(TBU¹)进行电调曲线标定,标定完成后将其设置于“Cross”电压点,重复以上步骤,按照顺序完成这条路径中其他 TBU(TBU², TBU³, TBU⁴, TBU⁵, TBU⁶, TBU⁷)的标定. 为了使 TBU 的测试开关电压逼近实际的开关电压,采用了“迭代扫描”的方法,即重复以上步骤,直到完成指定的迭代次数(迭代次数越多,越逼近实际的开关电压,但是会增加标定的时间),得到这条路径上所有 TBU 的标定结果. 路径 2~9 按照同样的方式进行标定. 每次迭代对 TBU 开关点的设置,相比上一次而言,实际减小了路径中 TBU 引起的干涉影响和杂散光的干扰,随着迭代次数的增加, TBU 的开关状态逐渐逼近实际的开关电压工作点.

利用以上方法,对 3×3 六边形网格结构中的 40 个 TBU 的开关电压进行标定,所有 TBU 开关状态的消光



(a) 标定路径划分



(b) 每条标定路径上TBU的标定

图6 迭代扫描法

比均可达到 30 dB. 图 7 选取了其中一个 TBU 的电调曲线, Bar 和 Cross 状态偏置电压分别为 4.50 V 和 6.61 V, 加热电极电阻为 1 260 Ω , 由此计算得到的半波功率为 18.6 mW. 此外, 对 TBU 的插入损耗 (Insertion Loss, IL) 进行了测试, 得到的 TBU 的平均插入损耗为 0.25 dB.

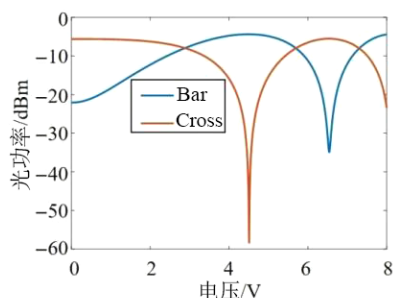


图7 单个TBU电压曲线

3.2.2 微环

微环谐振腔(简称微环)由环状波导与作为输入输出的直波导耦合构成, 可分为 all-pass 和 add-drop 型两种(示意图如图 3(a)和(b)所示), 从本质上说就是一个无限长脉冲响应滤波器. 当某些特殊波长的光在腔内传播的光程等于波长的整数倍时, 微环进入谐振状态,

可在环内积聚大量的能量. 环状波导的谐振效应使其具有独特的波长选择特性、高品质(Quality, Q)因子特性, 并由于其结构紧凑的特点, 在新一代光通信和高速全关信号处理系统中具有十分重要和广阔的应用场景. 自由光谱范围FSR、谐振峰半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)、品质因子Q是微环的重要参数, 可以用于衡量谐振性能的好坏. 传统的定制化光芯片一方面由于工艺偏差会造成谐振性能劣化, 另一方面由于缺乏调谐特性导致灵活度较差. 为此, 采用可编程光芯片构建了灵活可调的高性能微环.

图 8(a)为单网格 all-pass 型可编程微环的示意图, 传输光谱如图 8(b)所示, 单网格表示环形腔仅包含 1 个六边形网格, 该结构共包含 7 个 TBU, 其中 TBU⁴工作在 TC 状态; 通过调节 TBU⁴两个输出端口的分光比, 可以实现微环耦合系数的连续可调, 使其分别工作在欠耦合、临界耦合、过耦合状态, 图 8(c)展示了不同耦合系数条件下的消光比(Extinction Ratio, ER), 耦合系数为 0.39 时达到最大值 28 dB(临界耦合状态), 此时谐振峰的半高全宽为 0.019 nm, 因此该结构的 Q 值最大可达 8.1×10^4 ; 进一步地, 对 TBU⁹进行双臂加热, 通过热光效应改变其有效折射率, 从而改变微环的谐振波长, 图 8(d)描绘了不同双臂电压条件下, 微环谐振波长

在 0~90 pm 范围内变化的输出光谱图,由图中信息可知,微环相位调谐改变谐振波长不会造成消光比的劣

化,整个调谐范围内微环的消光比均可达到 20 dB 以上.

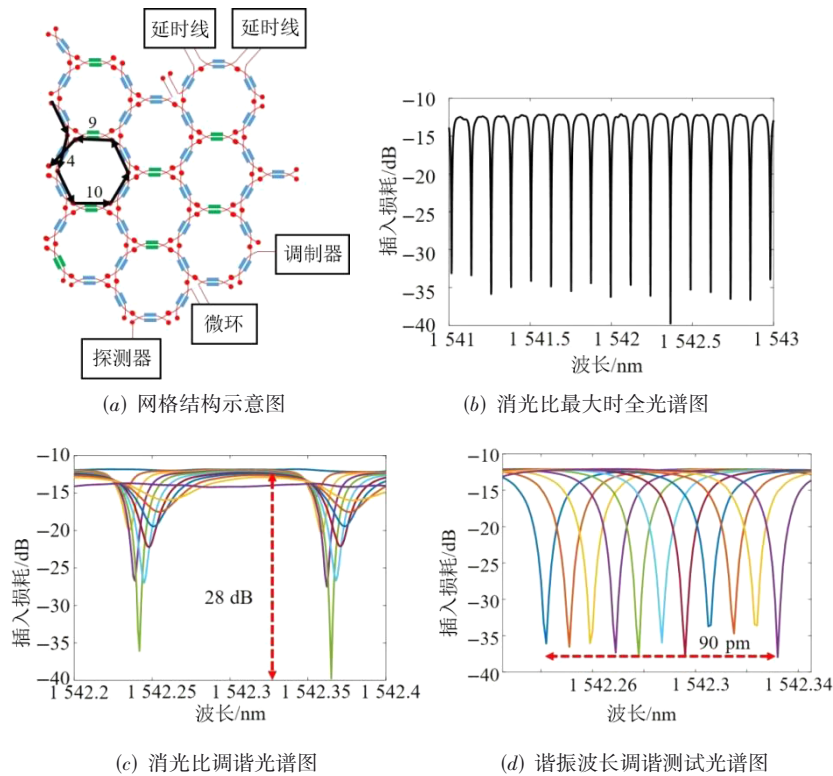


图8 可编程单网格微环

为了证明可编程光芯片的可重构特性,对网格中 TBU 进行重新编程,如图9(a)所示,TBU⁴仍然作为直波导和环形波导的耦合区,实现了从单网格微环到双网格微环的切换;图9(b)展示了TBU⁹相位变化时谐振波长的变化情况.由图中信息可知,整个调谐范围内,消光比维持在 20 dB 以上,最大可达 26 dB. 谐振波长调谐范围为 0~59 pm,和单网格微环相比调谐范围减小,这是因为单个 TBU 对环路的相位改变是一定的,当环路中总的 TBU 个数增加时,由谐振方程可知,相位变化导致的谐振波长变化范围减小,波长调谐能力降低;但是由于可编程光芯片在设计上存在一定的冗余,得益于这一特性,波长调谐能力的优化可以通过引入更多的调相 TBU 来实现,即通过调相“接力”的方式实现调谐范围的拼接,如双网格微环中除了 TBU⁹之外,还可以将环路中的 TBU¹⁰、TBU²⁰、TBU²¹作为调相 TBU,波长调谐能力将得到显著的改善.同样的,基于以上分析,单网格微环的谐振波长调谐范围可以提高到百皮米量级.此外,对两种网格微环的光谱特性进行了分析,由图9(c)的测试光谱图可知,单、双网格微环的自由光谱范围分别为 0.122 nm 和 0.072 nm,比值 61:36 接近两种结构环形腔中的 TBU 个数的反比 5:3,测试结果与理论

值近似相等.

3.2.3 马赫曾德尔干涉仪 MZI

马赫曾德尔干涉仪是一种常见的宽谱滤波器件,在光调制器、光开关、光计算、光量子领域具有重要的应用.由输入、输出耦合器和两个干涉臂组成,两臂光程差随着加热臂温度发生变化,实现光场的干涉相长与相消,其本质上是一个有限脉冲响应滤波器.

目前,定制化芯片的非等臂 MZI 在设计中忽略了两个干涉臂的传输损耗差异,当输入、输出耦合器采用 3 dB 分光的多模干涉仪 (Multi-Mode Interferometer, MMI) 分束器时,消光比性能较差,在一些宽谱测量领域无法实现高的测量精度.而可编程光芯片具有多个维度的自由度,可实现 MZI 多个参数的调谐,本文中,构建了可编程单网格 MZI (图 10(a)),光谱图如图 10(b)所示,和传统的 MZI 相比,可编程 MZI 的输入输出耦合器通过分光比任意可调的 TBU (TBU³ 和 TBU⁶) 来实现,采用输入耦合器耦合参数补偿的方法,在实验中使输出耦合器工作在 3 dB 耦合状态,根据两个干涉臂的损耗差异 (~0.5 dB) 确定输入耦合器的分光比,从而实现了超高消光比的 MZI,消光比可高达 42.3 dB,如图 10(c)所示.和微环类似,通过调

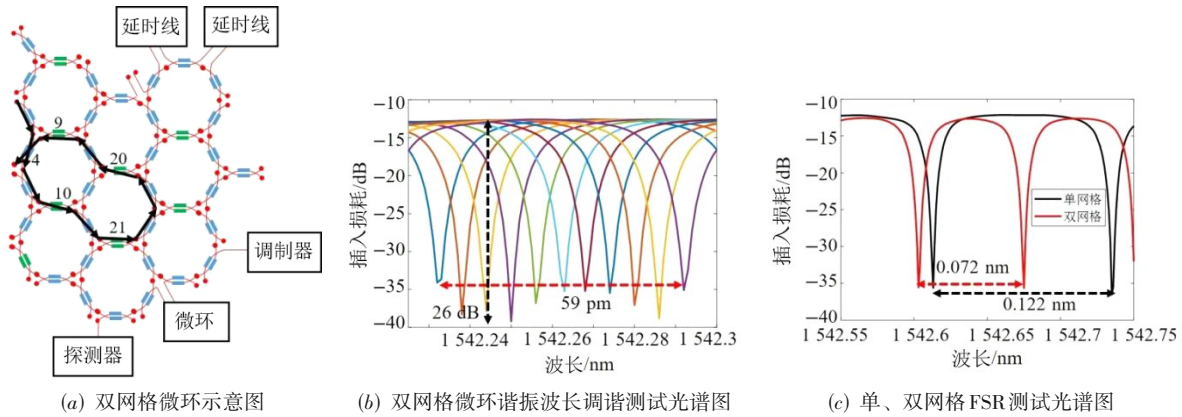


图9 单、双网格微环

节调相 TBU⁹ 的相位, MZI 的谐振波长可以实现大范围的调谐, 如图 10(d) 所示, 调谐范围为 0~216 pm, 远高于单网格微环的调谐范围, 且消光比始终保持在 42 dB 以上; 引用上节提到的“调相接力”的方式, 添加 TBU¹⁰ 作为调相 TBU, 单网格 MZI 的波长调谐范围可以继续扩大.

此外, 编程实现了双网格 MZI (图 11(a)), 由图 11(b) 的传输光谱图可知, 两种 MZI 的 FSR 分别为 0.122 nm (双网格) 和 0.367 nm (单网格). 网格数相等的

情况下, MZI 的自由光谱范围及波长调谐范围和微环相比具有大幅度的提升, 在宽带信号处理领域具有显著的优势.

3.2.4 延时线和光路由

可调光延时线在光学相控阵中具有重要的应用, 通过延时量的控制, 实现大范围内的角度扫描和波束指向. 可编程光芯片中每个 TBU 相当于一个等延时量的光缓存器, 通过路径的重构, 可以很容易地实现延时量的调节. 实验中将光 I/O 端口 18 和端口 19 设置为进、

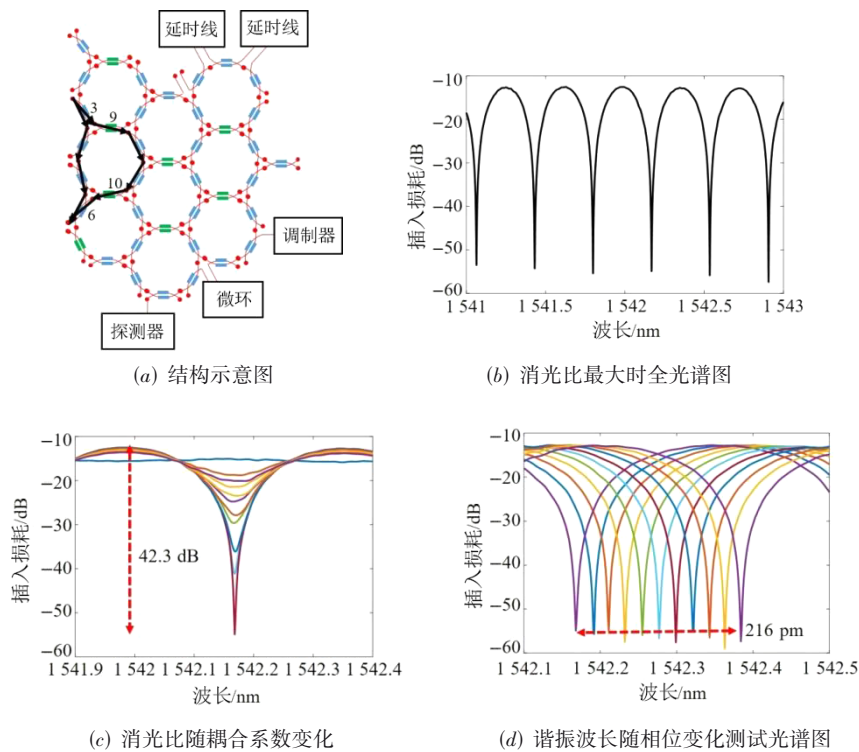


图 10 单网格可编程 MZI

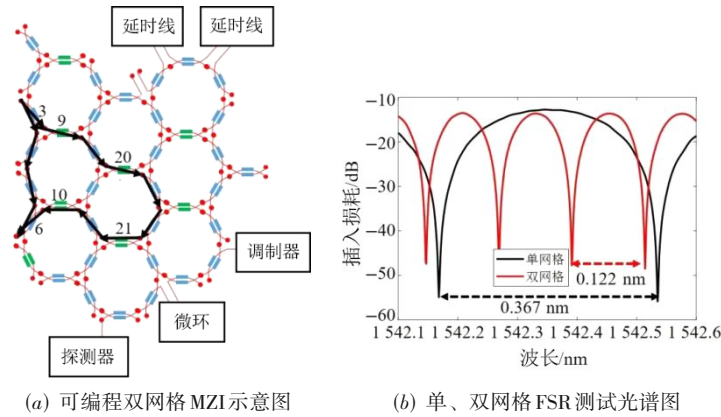


图 11 双网格可编程MZI及与单网格MZI对比

出光口,分别测试了2种不同路径下的相对延时量,从而获得单个TBU的延时,路径构建及示意图如图12(a)所示,其中路径(1)为参考路径.图12(b)展示了两种路径下的延时量测试结果,其中蓝色曲线表征延时路径(1)的测试结果,橙色曲线表征延时路径(2)的测试结果,由图中曲线的斜率可知,路径(2)的相对延时量为

54 ps,两种路径的TBU个数差异为4个,由此得出单个TBU的延时量约为13.5 ps.得益于六边形架构光路的环状特性及TBU精确的开关状态控制,当环路中的TBU只工作在“Bar”或者“Cross”状态且满足如图3(d)所示的路径交叉无干扰时,该芯片可实现大范围的延时量调节.

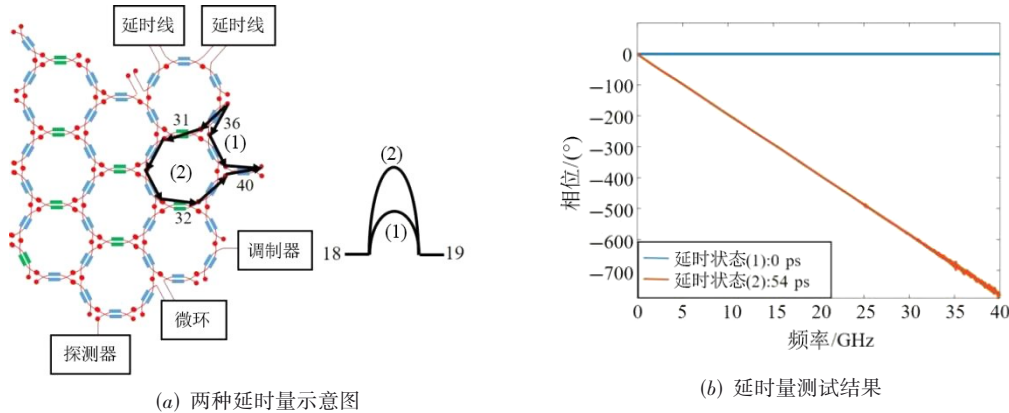


图 12 可编程延时线

与可调延时线类似,在不固定进/出光口的情况下,通过路径的编程重构,可以实现任意输入/输出端口之间的路径连接(路由).为了获得最低的插入损耗,以上两种情况下TBU均工作在开关状态而非TC状态,调谐功能的实现仅依赖于实际工作的TBU个数,这与可调谐微环和MZI存在显著的不同.

的可编程光芯片^[12,13]的部分关键性能参数的对比.为了方便比较,选取的两个芯片与本文芯片网格架构相同(六边形架构)、材料平台相同(SOI).由表1数据可知,和现有报道相比,本文的可编程光芯片在网络规模、TBU插入损耗、热光调谐效率(半波功率)等方面存在显著的优势.此外,该芯片具有更加灵活的调谐性能,如单网格微环消光比的调谐范围比文献[13]提高

表 1 列出了本文的可编程光芯片和现有文献报道

表 1 本文工作和现有文献报道的可编程光芯片的性能参数对比

| 文献对比 | 芯片架构 | 材料平台 | 网格单元数 | TBU数量 | 单个TBU插入损耗/dB | 单个TBU半波功率(P π)/mW | 单网格微环消光比(ER)调谐范围/dB | 单网格MZI消光比(ER)调谐范围/dB |
|----------|------|------|-------|-------|-----------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| 本文工作 | 六边形 | SOI | 9 | 40 | 0.25 | 18.5 | 0~28 | 0~42.3 |
| 参考文献[12] | 六边形 | SOI | 7 | 30 | 0.60 \pm 0.10 | 110 \pm 15 | — | 0~38 |
| 参考文献[13] | 六边形 | SOI | 4 | 19 | ~0.5 | — | 0~19 | — |

了 9 dB,单网格 MZI 消光比的调谐范围比文献[12]提高了 4.3 dB,实现了高性能的可编程器件的功能验证。

4 结论

依托联合微电子中心有限责任公司 CUMEC 的 SOI 自主工艺硅光平台,采用标准互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺,设计并制备了目前规模最大的六边形架构可编程光芯片,TBU 数量高达 40 个;通过扁平化优化布局,芯片尺寸减小了 21%,大大提高了集成度;利用迭代扫描法实现了大规模光网络中 TBU 开关电压的精确标定,所有 TBU 的消光比均高达 30 dB;得益于以上技术的优化,成功采用可编程光芯片实现了多种高性能的可调谐、可重构光器件的验证:其中微环的消光比可达 28 dB,且消光比可通过耦合状态的调整进行控制,谐振波长通过光开关相位的控制实现在 0~90 nm 范围内连续可调;完成非等臂 MZI 器件验证,通过输入耦合器耦合参数补偿的方式,消除了两个干涉臂传输损耗差异导致的消光比劣化,将可编程 MZI 的消光比提升到 42.3 dB,通过 TBU 相位调控实现在 0~216 nm 的波长范围内调控,且消光比不会发生显著的劣化,极大地提升了其在大带宽信号处理领域的精度;利用 TBU 的缓存特性,通过调整路径中的 TBU 个数,可编程光芯片实现了延时量大范围可调的延时线结构,以及任意光 I/O 端口之间的路由。本工作采用 CUMEC 自主工艺平台完成文献报道最大规模的可编程光芯片的设计与开发,通过编程控制实现了微环、MZI、延时线等功能的演示验证,并完成单一功能的多参数调控,充分证明了可编程光芯片的通用性、可编程、可重构、可调谐特性,为可编程光芯片实现更加复杂的功能及更广泛的应用奠定了理论和实践基础。

参考文献

- [1] BOGAERTS W, BAETS R, DUMON P, et al. Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(1): 401-412.
- [2] LEINSE A, HEIDEMAN R G, HOEKMAN M, et al. TripleX waveguide platform: Low-loss technology over a wide wavelength range[C]//*Proceedings Volume 8767, Integrated Photonics: Materials, Devices, and Applications II*; 87670E (2013). Grenoble: SPIE, 2013: 86-98.
- [3] BOGAERTS W, FIERS M, DUMON P. Design challenges in silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4): 8202008.
- [4] GUAN B B, DJORDJEVIC S S, FONTAINE N K, et al. CMOS compatible reconfigurable silicon photonic lattice filters using cascaded unit cells for RF-photonics processing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4): 8202110.
- [5] BOGAERTS W, PÉREZ D, CAPMANY J, et al. Programmable photonic circuits[J]. *Nature*, 2020, 586: 207-216.
- [6] PÉREZ D, GASULLA I, MAHAPATRA P DAS, et al. Principles, fundamentals, and applications of programmable integrated photonics[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(3): 709-786.
- [7] RECK M, ZEILINGER A, BERNSTEIN H J, et al. Experimental realization of any discrete unitary operator[J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(1): 58-61.
- [8] MILLER D A B. Self-configuring universal linear optical component[J]. *Photonics Research*, 2013, 1(1): 1-15.
- [9] CLEMENTS W R, HUMPHREYS P C, METCALF B J, et al. Optimal design for universal multiport interferometers[J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1460-1465.
- [10] ZHUANG L M, ROELOFFZEN C G H, HOEKMAN M, et al. Programmable photonic signal processor chip for radiofrequency applications[J]. *Optica*, 2015, 2(10): 854-859.
- [11] PÉREZ D, GASULLA I, CAPMANY J, et al. Reconfigurable lattice mesh designs for programmable photonic processors[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12093-12106.
- [12] PÉREZ D, GASULLA I, CRUDGINGTON L, et al. Multipurpose silicon photonics signal processor core[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 636.
- [13] CAO X P, ZHENG S, LONG Y, et al. Mesh-structure-enabled programmable multitask photonic signal processor on a silicon chip[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(10): 2658-2675.
- [14] CHEN X F, BOGAERTS W. A graph-based design and programming strategy for reconfigurable photonic circuits[C]//2019 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM). Piscataway: IEEE, 2019: 1-2.
- [15] PÉREZ D, CAPMANY J. Scalable analysis for arbitrary photonic integrated waveguide meshes[J]. *Optica*, 2019, 6(1): 19-27.
- [16] PÉREZ D, GASULLA I, CAPMANY J, et al. Hexagonal waveguide mesh design for universal multiport interferometers[C]//2016 IEEE Photonics Conference (IPC). Piscataway: IEEE, 2016: 285-286.
- [17] ZHOU H L, ZHAO Y H, XU G X, et al. Chip-scale optical matrix computation for PageRank algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020,

26(2): 8300910.

- [18] 曹国威, 范诗佳, 李智慧, 等. 光FPGA芯片及其标定方法[J]. 科学技术创新, 2022, (33): 101-105.

CAO G W, FAN S J, LI Z H, et al. Optical FPGA chip and its calibration method[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022, (33): 101-105. (in Chinese)

作者简介



李智慧 女, 1992年2月出生于河北省唐山市. 2019年毕业于电子科技大学光电科学与工程学院. 现为联合微电子中心有限责任公司工程师. 主要从事可编程光芯片及氮化硅相关的研究工作.

E-mail: zhihui.li@cumec.cn



梁宇鑫 男, 1989年3月出生于河北省唐山市. 2019年毕业于大连理工大学物理与光电工程学院. 现为联合微电子中心有限责任公司高级工程师. 主要从事氮化硅光子集成和可编程光芯片方面的研究工作.

E-mail: yuxin.liang@cumec.cn



范诗佳 男, 1996年1月出生于湖南省邵阳市. 2020年毕业于电子科技大学光电科学与工程学院. 现为联合微电子中心有限责任公司工程师. 主要从事硅光设计方面的研究工作.

E-mail: shijia.fan@cumec.cn



廖海军 男, 1993年8月出生于重庆市奉节县. 2018年毕业于西南交通大学电气工程及其自动化专业. 现为联合微电子中心有限责任公司中级工程师. 主要从事微波光子及其延时线电路设计方面的研究工作.

E-mail: haijun.liao@cumec.cn



刘大鹏 男, 2020年博士毕业于中国科学院半导体研究所. 现为联合微电子中心有限责任公司高级工程师. 主要从事集成微波光子技术方面的研究工作.

E-mail: dapeng.liu@cumec.cn



冯靖 男, 1994年12月出生于安徽省安庆市. 2019年毕业于南京航空航天大学电子信息工程学院. 现为联合微电子中心有限责任公司中级工程师. 主要从事微波光子技术方面的研究工作.

E-mail: jing.feng@cumec.cn



崔乃迪 男, 博士. 联合微电子中心有限责任公司硅基光电子中心副主任、高级工程师, 重庆市鸿雁计划入选者. 主要从事光子集成技术及微波光子技术领域的研究工作. 先后主持包括国家自然科学基金、国防创新特区专项、173重点项目、中国电科XX工程在内的多项国家级及省部级项目. 在国内外一级学术期刊和重要学术会议上发表论文十余篇, 授权专利十余项.

E-mail: naidi.cui@cumec.cn