从光子集成迈向光电融合集成回路：以微环波长锁定为例*

谭 旻[1,2]，明 达[1]，汪志城[1]
（1.华中科技大学光学与电子信息学院 武汉 430074；2.武汉光电国家研究中心 武汉 430074）

摘 要：受物理极限及经济成本的约束，以晶体管尺寸缩减为核心的摩尔定律将难以持续。2016年国际半导体技术路线已经停止发表，国际上一致认为摩尔定律即将走向终结。与此同时物联网、人工智能、大数据等新兴应用层出不穷，对信息技术的性能要求日益增强。受摩尔定律放缓影响，微电子技术将难以满足新兴应用在能量效率和信息容量等性能方面快速提升的需求，两者之间的鸿沟持续扩大，整个信息产业的可持续发展面临着巨大的挑战。把光电子器件融入微电子平台，充分结合电子和光子两个方面的优点，被普遍认为是解决以上挑战的有效方案。目前国际上在光子集成方面取得了一定的进展，但是光电融合方面的研究工作大部分集中在物理结构的集成方面，把光子与电子紧密结合起来的信号回路技术目前还处于起步阶段，光电融合技术总体上处于“单个晶体管”时代。本研究试图提出一种把集成电路设计方法和光子集成相结合的光电融合集成回路技术演化路线，并以微环波长锁定为例介绍光电融合集成回路在建模、仿真、设计、应用等方面的研究进展。

关键词：光电融合；集成回路；器件建模；快速仿真；闭环反馈
中图分类号：TM712 **文献标识码**：A **国家标准学科分类代码**：510

From photonic integration to electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits: a case study of wavelength locking of microrings

TAN Min[1,2], MING Da[1], WANG Zhicheng[1]
(1. School of Optical & Electronic Information, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, Wuhan 430074, China)

Abstract: Due to both physical and economic constraints, Moore's law, which predicates the continuous scaling of transistors, is approaching to its end. International Technology Roadmap for Semiconductors has ceased to update since 2016, suggesting that the research community has reached a consensus regarding the end of Moore's law. Meantime, new applications (e.g., IoT, artificial intelligence, big data, etc.) are emerging rapidly, and call for devices with better performance. As Moore's law slows down, the information industry is facing the energy and capacity challenges of these new applications. The gap between technology advancement and fast-increasing demand continues to grow, creating a great challenge for the sustainable growth of the information technology industry. Electronic-photonic convergence enjoys the advantages of both electronics and photonics and is widely regarded as an effective solution to resolve the above energy and capacity challenges. Progress has been made regarding photonic integration, but tight interactions between electronics and photonics have not been achieved yet. Electronic-photonic convergence is now still in its "single-transistor" stage, and most research so far has been focused on device integration technology. This paper

*基金项目：国家重点研发计划“纳光子器件及光电融合集成基础”（2018YFA0704400）项目资助
谭旻（通信作者），研究员，研究方向为光电融合集成回路。E-mail：mtan@hust.edu.cn

attempts to create a roadmap for developing electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits by combining the design methodology of microelectronic integrated circuits with photonic integration. Using wavelength locking of microring resonators as a case study, we present the recent progress on the modeling, simulation, and design of electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits.

Keywords: electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits; integrated circuits; device modeling; fast simulation; feedback

0 引 言

信息技术是推动社会发展的重要驱动力,集成电路则是信息技术的核心。集成电路自1958年发明以来[1],已经渗透到人类生活的各个领域,深刻地改变了整个人类社会。集成电路的发展受益于以晶体管尺寸的持续缩减[2]。半个多世纪以来,晶体管尺寸按照摩尔定律所预测的方式持续缩减,目前特征尺寸已经减小到7 nm以下[3]。受物理极限及经济成本的限制,进一步减小晶体管尺寸面临着非常大的挑战,国际上普遍认为摩尔定律即将走向终结。自2016年起国际半导体技术发展路线图已经停止更新。与此同时,物联网、大数据、虚拟现实、人工智能等新兴应用不断涌现,这对信息技术在功耗、速度等方面提出了更高的要求。随着摩尔定律走向停滞,信息技术与应用需求之间的鸿沟将逐步扩大,整个信息产业的可持续发展面临着重大挑战。

把光子器件融入微电子平台,可以结合光子和电子两个方面的优势,打破传统微电子技术在功耗及速度等方面的瓶颈,满足不断提升的应用需求,应对当前信息产业面临的重大挑战。集成电路通过片上器件对电信号进行处理,集成光路通过片上物理结构的设计对光信号进行处理。通过把电子和光子集成到同一衬底,光电子集成技术可以结合光子和电子两者优点,在过去几十年一直广受国内外关注,并取得了非常丰富的研究成果。然而光电子集成技术比集成电路技术更加复杂,难度更大,含有更多类别的光子和电子器件,在光源、工艺兼容、大规模制备等方面依然面临着诸多短时间内难以克服的挑战,目前为止并没有实现大规模实用化。出于经济效益和技术代价的考虑,实际上也不宜过早地追求大规模光电全集成[4]或者攀比和追求集成度的概念[5]。目前的光电系统大多还是以分立元件或者光子芯片和电子芯片混合集成的方式实现。实际上,集成电路本身也并不意味着把所有的器件全部集成到一个衬底上。射频集成电路是在20世纪90年代后期才逐步实现电感的集成,目前还有大量微电子系统是以分立或者混合集成的形式实现的。不管是混合、单片或者其他形式实现的实用化光电集成系统,集成光子回路必须配置相应的集成电子回路;光电子技术将与微电子技术相辅相成,直至互相渗入并最终融为一体[6-8],形成一个光子和电子融合在一起的光电融合系统[9]。光与电的融合包括物理结构的融合和信号回路的融合两个方面。混合集成、单片集成等可以认为是光电融合的物理集成方式。光电融合集成回路侧重于基于光与电通过物质互相作用的物理机制,通过器件之间的连接来控制光子、电子的动态运动及相互调节,从而实现光电信号的快速、稳定和高效处理。光电融合集成回路可以采用混合集成或单片集成等多种物理实现方式。硅基光电子[10]是近年来蓬勃发展的新兴光电集成技术,可以在同一衬底上实现大部分光子器件和电子器件的集成,是光电融合集成回路的重要实现方式。硅基光电子也被认为是后摩尔时代的重要选项,在光量子方面也有重要的应用,已经引起了国内外的广泛关注。美国、欧洲、日本等发达国家已经把硅基光电子上升到国家战略高度,并投入了巨资进行相关研究。

目前国际上在光子集成方面取得了一定的进展,但光电融合技术的研究工作大多还停留在工艺和器件等物理结构的融合方面,总体处于“单个晶体管”时代[11]。如图1所示,目前光电融合系统正处于从器件和集成技术到回路技术的过渡时期,下一阶段必须发展与集成电路类似的信号回路技术,逐步

迈向大规模光电融合。光与电相融合的信号回路技术是光电融合的新挑战，目前国际上也没有成熟的经验可以借鉴。老一辈科学家非常有远见和有前瞻性地预见了微电子基础技术和自动化设计工具对于发展光电融合技术的重要性[4]。集成电路的发展经验无疑可以对光电融合集成回路的发展提供重要的借鉴，然后具体如何借鉴该经验目前尚无明确的方案。本文试图提出一种把集成电路设计方法和光子集成相结合的光电融合集成回路技术演化路线[12]，以加快光电融合集成回路的发展进程。同时以微环波长锁定为例，介绍光电融合集成回路在设计、仿真建模及应用方面的最新研究进展。微环谐振器面积小、制作方便，在通信、计算、传感、量子等诸多方面均有重要的应用[13-14]，其波长控制回路是非常典型的光电融合回路，是一个非常好的研究切入点。第1小节简要回顾光子集成微环谐振器的发展历史及与光电融合集成回路的关系。第2小节提出光电融合集成回路的技术演化路线。第3小节介绍微环波长锁定的建模和仿真。第4小节介绍微环波长锁定控制器电路实现方面的研究进展。第5小节介绍波长锁定技术的应用。第6小节给出对光电融合技术的未来展望。第7小节给出全文的总结。

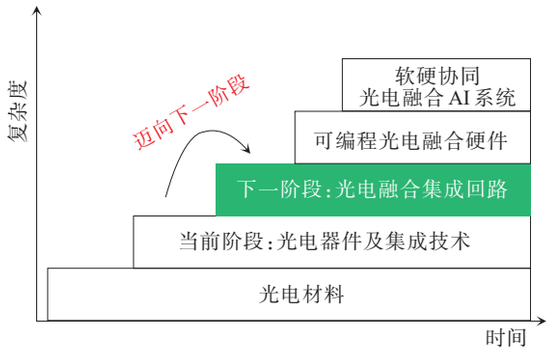


图1 光电融合系统的演化过程

Fig.1 Evolution of electronic-photonic converged systems

1 光子集成微环谐振器

微环是一种基本的光学单元，在激光、放大器、传感、调制、开关、路由、逻辑等方面均有重要的应用。1969年美国贝尔实验室Marcatili[15]博士第一次提出了集成微环谐振器的概念。1971年Weber和Ulrich[16]首次实现了光学波导环形谐振器。1982年Stokes等[17]首次实现了基于玻璃光纤的环形谐振器。1983年Walker和Wilkinson[18]使用银离子交换玻璃平面波导实现了集成的微环谐振器。1997年美国西北大学Rafizadeh等[19]首次实现了片上侧向耦合的AlGaAs/GaAs微环谐振器。1998年Little等[20]首次实现了硅基微环谐振器，微环半径仅为3 μm。基于SOI工艺的微环谐振器的包层和芯层有较大的折射率差，波导可以在较小的损耗情况下实现非常小的弯曲，面积可以做得非常小。微环使可以实现非常多的功能，同时也具备大规模集成的潜力，被很多业内人士认为是实现大规模光子集成的关键单元。

然而微环性能易受工艺偏差、温度及噪声等诸多因素影响，面临着稳定性的挑战。另外一方面我们希望微环的性能能够通过热光、电光等机制进行动态调节。以上两方面的因素要求我们能够对微环进行动态可控的调节，采用电学的方式对光参数进行调节就成为了必然，而闭环反馈是实现动态可控调节的唯一手段。目前大部分工作都是使用板级电路或者试验台来实现光学参数的电控制，光与电尚未紧密融合起来。光电融合集成回路是实现低成本、低功耗片上光参数电控制的核心技术，也是通往大规模光电融合的必然之路。

2 光电融合集成回路技术演化路线

光电融合集成回路和集成光路均需要以光与物质的互相作用为基础，但是两者又存在一些关键的区别。集成光路侧重于通过结构和组分等物理上的设计来调节片上光与物质之间的相互作用。光电融合集成回路侧重于基于光与物质互相作用的物理机制，通过器件之间的连接和物质参数的动态调节来控制片上光子、电子的运动及相互作用，从而实现光电信号的快速、稳定和高效处理。举例而言，通过热光效应可以动态改变光子器件的折射率来实现光信号的相位调节。从研究物质结构到研究物质动态过程，这在研究上是一个很大的飞跃[21]。光电融合集成回路在集成光路的基础上加入了光子与电子器件之间的连接及光与电的动态互相作用，也必将带来类似的研究上的飞跃。实际上任何实用化的集成光

路都必须配之相应的电子回路[8-9],光电融合单片全集成回路可以被认为是集成光路的终极形态。

集成电路的发展经验值得光电融合集成回路学习和借鉴。集成电路是目前唯一可以大规模扩展化及实用化的片上信息处理系统。经过过去半个多世纪的发展,已经形成了一套包括工艺、器件、电路、系统、设计工具及应用等环节的全流程集成电路产业链。产业链的各个环路互为补充、相互促进,形成了一个全球化的产业生态系统。相比传统集成电路,光电融合集成回路更为复杂,其大规模实用化必然需要类似的产业链和生态系统。光电融合集成回路,特别是基于硅基光电子的光电融合集成回路,可以复用集成电路的基础设施,并借鉴集成电路的产业链和生态系统发展经验,在规模化生产方面有着巨大潜力。在实现大规模实用化之前,光电融合集成回路还存在许多的新兴挑战需要克服,借鉴集成电路的发展经验将帮助我们加速这一进程。

没有实用化的光电融合集成回路,集成度的提升没有任何意义,而集成度本身也不应该成为发展回路技术的障碍,因为光电融合或者光电集成技术本身是为了解决实际问题而发明的。回路技术和集成技术是互相促进的关系。实用性的回路技术将拉动集成度的提升,而集成度的提升则可以促进回路技术的发展。需求拉动和技术推动是一个普遍的技术发展逻辑,只有当技术进步带来的收益大于技术进步所需要的资金才能够维持可持续发展。就光电融合技术而言,实用化的光电融合集成回路是提升技术收益实现可持续发展的必要环节。

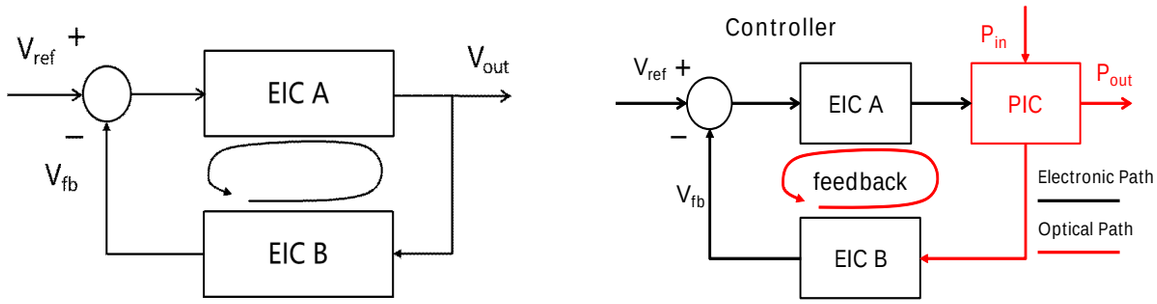
2.1 光电融合集成回路的挑战

光电融合集成回路的主要挑战包括片上光参数稳定性、光子与电子器件工艺兼容问题、仿真速度的失配问题、电子芯片和电子芯片的尺寸失配问题、自动化设计工具缺失等。受工艺偏差、温度及串扰等随机因素的影响[22],片上光子器件的性能参数通常具有不确定性,难以满足很多应用对于片上光参数的性能要求。通过材料、工艺及器件级的优化能够减小不确定性,但是难以完全消除不确定性,通常也不足以满足实用化的要求。光子器件的制作工艺和集成电路的制作工艺有一定的差别,不经任何改动的集成电路工艺难以直接用来制造高性能的光子器件。而工艺制造的改变可能带来兼容性及经济成本上的挑战。光频率比电频率要高出许多数量级,光电融合集成回路仿真需要以最高信号频率来设置仿真步长,这意味着整体仿真时间将大幅延长,如何减小仿真时间是光电融合集成回路仿真所面临的重大挑战。光子功能模块的面积通常要远大于晶体管,而某些重要光子器件的控制电路则远大于光子器件本身,电子芯片和光子芯片存在着面积失配的问题。目前没有专门针对光电融合集成回路的仿真工具,现有的仿真方法均是对已有光子仿真平台或者电子仿真平台的简单扩展。

在以上所有的挑战中,片上光参数稳定性是一个极为重要而又无法回避的问题。大规模光电融合技术的实用化很大程度上取决于能否在有限的资源条件下有效地解决此问题。目前看来使用动态反馈控制的方法对片上光参数进行控制是解决这一问题的唯一有效手段。通过对片上光参数进行监控,并根据监控信号实时调节光器件状态,可以实现片上光参数的稳定。然而光电融合反馈控制和集成电路反馈控制存在着较大的区别,如图2所示,与集成电路反馈环路相比,光电融合反馈环路包括光和电两种不同类型的信号,这带来了新的挑战。片上光信号检测及片上光子器件状态调节均是在集成电路反馈环路中不存在的。根据应用要求的不同,需要检测强度、偏振、相位等不同维度的光信息,这给片上光信号检测带来了挑战。如何实现高效的片上光器件状态调节也是以前不存在的新问题。另外,电信号很难作为参考信号来控制光参数,这给参考信号的设计带来了挑战,需要巧妙地设计控制算法来维持光参数的稳定性。

2.2 集成电路的技术演化路线

集成电路包括模拟集成电路[23]、射频集成电路[24]以及数字集成电路[25]等重要的类型。模拟集成电路以放大器为核心,主要用来处理连续的模拟信号。实际应用中,放大器通常会被配置成闭环工作模式,用来消除或者减弱工艺偏差、噪声、温度等随机因素



（a）集成电路反馈回路
（a）Feedback diagram of the microelectronic integrated circuits

（b）光电融合反馈回路
（b）Feedback diagram of the electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits

图2 不同类型反馈回路的对比

Fig.2 Comparison of different types of feedback circuits

的影响。稳定性是闭环反馈控制系统的核心关键问题。射频集成电路通常使用混频的方式把基带信号移至高频进行处理，这需要一个高性能的本地振荡信号。振荡信号的产生需要一个闭环反馈环路，同时需要满足一定的振荡条件。数字集成电路可以分为时序逻辑电路和组合逻辑电路两种类型。时序逻辑是数字电路可扩展化的关键。时序逻辑根据寄存器当前状态和输入信号产生输出信号及寄存器的下一个状态。时钟、寄存器及数字信号的反馈是数字集成电路的3个核心要素。

反馈和寄存器是构成以上3种集成电路的关键要素。除此之外，大规模集成电路设计还非常依赖于紧凑器件建模[26]及电子设计自动化工具[27]。紧凑器件模型使大规模仿真成为可能，高效的自动化设计工具则可以大幅缩短设计周期。技术的发展受应用需求的驱动，两者互相促进造就了集成电路产业半个多世纪的辉煌。以晶体管尺寸缩减为核心的摩尔定律是集成电路技术进步的主要方式。技术进步催生了新的市场需求，而新市场所带来的收益被用于投资新技术，进一步促进技术发展。反馈、寄存器、电子设计自动化工具、应用需求及器件尺寸持续缩减是支撑集成电路技术发展的5个关键因素。

图3总结了集成电路的技术演化路线。闭环反馈是模拟、射频及数字集成电路的基础。寄存器是实现时序逻辑的前提。时序逻辑、组合逻辑及以晶体管尺寸持续缩减是数字集成电路大规模扩展化的关键。对于射频集成电路而言，通常需要形成稳定的本地振荡器，采用闭环反馈环路实现稳定的本地振荡是通常使用的技术手段。

除此以外，功率集成电路可以被认为是模拟集成电路的一个分支，侧重于功率相关的信号处理和控制。需要说明的是，本技术演化路线包括了最主要的集成电路类型，但是并非所有的集成电路都可以归类于这3种类型。举例而言，数模转换器和模数转换器等混合信号集成电路既有模拟集成电路的成分也有数字集成电路的成分；高频的数据驱动既需要使用模拟集成电路的技术也涉及射频集成电路的某些技术。尽管如此，该技术路线为其他大规模片上信息处理系统的构建提供了一个很好的参考，值得光电融合集成回路、基于新兴器件的模拟人工智能系统等其他类型的新兴片上信息处理系统借鉴和学习。

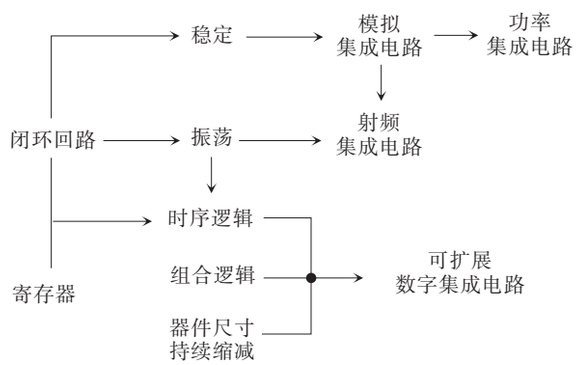


图3 集成电路的技术演化路线

Fig.3 Technological evolution roadmap of integrated circuits

2.3 光电融合集成回路的技术演化路线

集成电路的技术演化路线值得光电融合集成回路借鉴,然而由于两者在某些关键技术要素方面存在一定差异,光电融合集成回路无法照搬集成电路的技术路线。首先,目前没有实际可用的光寄存器,这就意味着无法进行构造光电融合时序逻辑。其次,以波导为例,光子器件尺寸必须和光信号波长匹配,这就意味着不存在一个类似晶体管的光器件尺寸持续缩减机制。基于以上两点原因,光电融合集成回路无法形成类似数字集成电路的可扩展数字光电融合集成回路。值得注意的是,虽然光子器件无法实现持续尺度缩减,但是可以通过巧妙的结构和回路设计实现整体尺寸的缩小。虽然光电融合集成回路能够以模拟光电融合集成回路和微波(或射频)光电融合集成回路的形式存在,它们和传统的集成电路在基本原理上存在一些重要的区别。具体而言,传统集成电路的反馈环路由单一的电信号构成;而光电融合集成回路的反馈环路可以同时包括电信号和光信号,是一个光电混合的反馈回路,而光电混合反馈回路是维持片上光参数稳定性的重要手段。光信号的加入给自动化设计带来了新的挑战,传统的电子自动化设计工具无法满足光电融合集成回路的设计需求,必须发展新的光电自动化设计工具来应对光电融合自动化设计的新挑战。光电融合芯片可以同时获取低频的电信息及高频的光信息,拓展了集成电路的信息获取范围,带来了新的功能。功能增加及性能提升必将带来大量新兴应用。与集成电路类似,光电融合集成回路将可能促进物联网、自动驾驶等在内的大量新兴应用的大规模普及。反馈、整体尺寸缩减、光电自动化设计工具、新功能、新应用将是推动光电融合技术发展的5个关键因素。

图4总结了光电融合集成回路的技术演化路线。该路线侧重通过器件之间的连接来控制光子、电子的动态运动及相互调节。传统的集成电路和集成光路分别侧重于电信号之间的互相作用及光与物理结构之间的互相作用,可以认为是光电融合集成回路的子集。反馈控制是光电融合集成回路的核心,是构成模拟光电融合集成回路及微波(或射频)光电融合集成回路的基础。功率光电融合集成回路可以被认为是模拟光电融合集成回路的一个分支,侧重于与光信号相关的功率处理。类似集成电路的技术演化路线,光电融合集成回路技术演化路线包括了最主要的光电融合集成回路类型,但是并非所有的光电融合集成回路都可以被简单地归类到这两种类型。

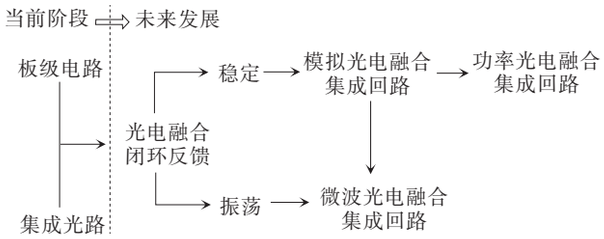


图4 光电融合集成回路的技术演化路线

Fig.4 Technological evolution roadmap of electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits

3 微环波长锁定的建模和仿真

3.1 光子器件建模

随着光电融合集成回路的规模和复杂度不断提升,大规模光电联合仿真势在必行。传统的SPICE模型[32]已经可以很好地描述电学器件的物理特性,与成熟电子设计自动化(EDA)工具相结合的光电联合仿真方法有潜力成为重要的解决方案。光子器件的建模将是联合仿真中的重要前提。

目前,已经存在许多光子器件建模方案,如表1所示。文献[28-29]在得到光子器件特征曲线后,通过矢量拟合算法(VF)得到光子器件的s参数,从而得到光子器件的仿真建模。此类方法可以根据光子器件的实验曲线或者仿真曲线来定制光子器件模型,但是基于s参数的建模方法只能用于无源光子器件,不能用于描述调制器等有源光子器件。受限于无源器件,此方法难以应用于闭环仿真。针对同一种光子器件结构,一旦结构参数(如波导宽度等)发生变化,其特征曲线相应地会发生改变,因此需要重新根据特征曲线来提取s参数,导致模型的灵活度受限[33]。文献[30]根据光子器件的物理特性来建立光子器件模型,并利用与EDA仿真平台兼容的Verilog-A语言进行描述,能够在EDA平台上进行时域上的

光电联合仿真，但是此类建模方法仍存在一些问题亟待解决。微环谐振器波长锁定电路是涉及光、电、热等多种参数类型的闭环光电环路。然而大部分的光子器件模型只考虑了电光调制效应，而另外一部分工作只考虑了热光效应；但是针对以上应用，需要同时考虑这两种效应。除此之外，闭环联合仿真往往需要光子器件模型以及电子器件模型能够进行支持频域仿真。现有的电学器件模型可以很好地进行频域仿真，但是目前的光子器件模型还难以与电子模型实现协同频域仿真，这将大大限制混合环路仿真在微环波长锁定等闭环设计中的应用。研究[31]结合EDA工具，利用Verilog-A语言，能够很好地描述大部分光子器件模型，并可以可靠地解决上述问题。

表1 模型对比

Table 1 Comparison of models

	文献[28-29]	文献[30]	文献[31]
建模类型	基于s参数	基于Verilog-A	基于Verilog-A
支持器件模型类型	无源	无源，有源	无源，有源
支持的仿真的类型	开环，光电联合仿真	闭环，光电联合仿真，热光联合仿真	闭环，光电热联合仿真

值得一提的是，针对高速应用，光子器件模型与电子器件模型接口处的电学特性尤为关键。目前，还没有看到成熟的工作可以很好地实现高速调制下的闭环光电仿真。另外，针对多微环的应用，微环之间的热串扰将会影响微环的工作状态，以上仿真模型尚不能解决此类问题。

3.2 闭环光电联合仿真

基于可靠的光子器件模型，结合成熟的电子模型，理论上可以实现可靠的光电联合仿真，但是仍存在许多问题。光载波频率非常高（～100 THz），然而感兴趣的频率范围并不大（～10 GHz），这会大大降低仿真效率。文献[28-29]通过频率转换，将原先的带通模型转换为等效基带模型，从而在不损失任何数据信息的前提下，实现可靠的光子器件仿真。由于该模型只能描述无源器件，所以无法用于考虑了光电效应、热光效应等的闭环光电联合仿真。频率转换的思想同样可以应用于行为级模型。文献[30]通过频率转换，一定程度上提高了光电联合仿真效率。但是频率转换后的信号频率与热变化频率（～10 Hz）之间仍然存在很大的失配。由于时域仿真精度需要与最高频率的信号相匹配，这将导致仿真效率仍然不高。在上述研究中，光信号是由带有幅度、频率以及相位等信息的光波来描述的。这种描述方式不可避免地要面临光波频率与仿真效率的折衷。类似于电学仿真中利用电压和电流两种特性信息来描述电信号的方法，文献[31]直接将光的幅度、频率等信息作为多路信号在光路中进行传输，从而避免了直接处理频率很高（～THz）的光波，大大提升了仿真效率。但是与电路仿真相比，联合仿真效率仍需进一步提高。

3.3 多微环系统的仿真

多微环系统的仿真需要在单微环仿真的基础上考虑以下两个方面的新挑战：多微环的热串扰建模及多微环光电联合仿真。多微环波长锁定仿真研究目前仍处于初级阶段，尚未有系统性的研究成果。

Sorace-Agaskar[30]在单个微环谐振器Verilog-A建模的基础上仿真实现了由多个微环级联的高阶微环滤波器；同时基于单个微环调制器的Verilog-A建模仿真实现了波分复用（WDM）系统。但是该研究没有考虑微环之间的热串扰。Milanizadeh[34]提出了热本征模式分解（thermal eigenmode decomposition）的技术，通过提前考虑串扰对热调器上的电压进行补偿，从而抵消光子器件间固有的热串扰效应，该研究对多微环的热串扰建模和消除热串扰的多微环波长锁定芯片设计有一定的借鉴意义。

4 微环波长锁定的控制电路实现

光电融合集成回路和集成电路有相似之处，但是也存在一些重要的差别。光电混合环路是一个新问题，电信号不能够作为光信号的参考信息，无法采用类似运放的反馈控制方式把输出信号调节至输入参考信号。很多应用需要多个微环互相配合来实现一个完整的功能，而集成电路通常仅仅对一个参数进行控制。这意味着现有的集成电路设计方法无法直接用于多个微环谐振器的控制。由于以上两个重要的不同，光电融合集成回路难以完全借鉴集成电

路的设计方法。我们需要解决集成电路的发展经验对光电融合集成回路进行“再发明”。

4.1 单微环锁定电路

微环谐振器具有面积小、功耗低等诸多优点，在光通信[35]、光计算[36-38]、光生物传感[39]等领域有广泛的应用。然而，微环谐振器的谐振波长容易受到外界热变化、输入激光变化以及工艺偏差的影响，其工作状态难以维持稳定，这限制了微环谐振器的商用化进程。

目前已经有许多研究尝试解决此问题，大致可以分为开环方法和闭环方法两大类。开环方法的基本思想是对微环做热隔离或者是采用补偿的方法来消除温度变化对微环的影响。文献[40]采用具有负热光效应系数的TiO_2材料来补偿硅材料的正热光效应系数，从而实现与温度无关的微环，但是由于引入了新材料，难以在传统的CMOS工艺平台实现。文献[41]将微环耦合到马赫-曾德尔干涉器的一条“臂”上，使得温度变化导致的微环有效光学长度变化与干涉器的有效光学长度变化相抵消，从而实现补偿。虽然此方法没有引入新材料，但是使用马赫-曾德尔干涉器会占用较大的面积。开环方法只能在一定程度上隔离外界温度的变化，并不能完全消除温度变化造成的影响。针对微环调制器的应用，温度变化（甚至是很小的温度变化）会导致谐振波长发生漂移，使得调制器的消光比减小，从而导致调制能力降低，增大传输过程的误码率。除此之外，当输入激光波长变化或者微环谐振器制造存在工艺偏差时，这种开环方法仍需要手动调谐来补偿上述影响，使微环正常工作。

闭环方法通过反馈的方式来稳定微环谐振器工作状态。文献[42-43]通过温度传感器来监控微环谐振器的温度从而来稳定微环的工作状态，相较于绝热微环的方案，这种方法可以很好地稳定微环的温度，但是仍然难以补偿输入激光变化和工艺偏差的影响。文献[44]利用无接触集成光子探头（CLIPP）检测出微环谐振器环形波导的载流子浓度变化，进而检测出微环的温度变化，工艺偏差等，最终通过与集成加热器协同工作，稳定微环谐振器的工作状态。文献[45]采用谐振器内光电导加热器（IRPH）来检测和调谐环形谐振器的谐振波长。以上方法可以很好地补偿温度变化和工艺偏差带来的影响，但是需要大量前期校准工作来确定器件特性（如微环调制器PN结中的载流子浓度变化[44]或者微环掺杂区中的暗电流变化[45]）与微环温度变化的对应关系，所以难以应用于大规模集成当中。目前，基于集成加热器以及光电二极管的微环谐振波长锁定电路[46-50]可以很好的稳定外界温度变化，同时能够补偿输入激光变化以及工艺偏差的影响。如图5所示，其基本工作原理为：片上光-电转换模块（如光电二极管等）将环形波导或者直波导中的光信号转换为电信号，然后通过算法处理模块计算出合适的输出值，最后通过合适的控制方法（如数模转换器）驱动集成加热器，最终达到调节微环谐振器工作状态的目的。表2从是否能补偿温度变化和是否能补偿工艺偏差以及输入激光波长变化两个方面对不同波长控制方法进行了对比。

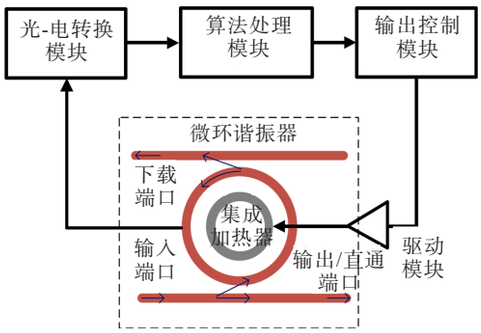


图5 基于集成加热器的微环谐振器闭环锁定电路框图

Fig.5 Block diagram of closed loop locking circuit of microring resonator based on an integrated heater

微环的波长锁定可以通过不同的算法来实现，如表3所示。文献[46–48]通过加入抖动信号来稳定微环的谐振波长，但是此方案会增大传输过程中的误码率。文献[50]采用眼图最大锁定算法很好地实现了微环调制器传输数据时的微环谐振波长锁定，但是此方案需要对电路进行精准的延时调节，等效地把微环谐振波长的调节问题转换成了延时的调节问题，难以实现满足实用要求的微环谐振波长自动锁定。同时，此方案的锁定过程要求特定的数据传输序列，对数据传输的格式提出了限制。文献[49]通

表2 不同波长控制方法的比较

Table 2 Comparison of different wavelength control methods

	波长锁定方法	是否能补偿热变化	是否能补偿工艺偏差以及输入激光波长变化
开环方法	负热光效应系数的包层[40]	是	否
	光学补偿(马赫-曾德尔干涉仪MZI)[41]	是	否
闭环方法	基于温度传感器的微环波长锁定[42-43]	是	否
	基于无接触集成光子探头(CLIPP)[44]	是	是
	基于谐振器内光电导加热器(IRPH)[45]	是	是
	基于集成加热器以及光电二极管的微环波长锁定[46-50]	是	是

表3 不同波长控制算法的比较

Table 3 Comparison of different wavelength control algorithms

	文献[46-48]	文献[50]	文献[49]
锁定算法	抖动信号+锁到参考点	眼图最大锁定法	眼图最大锁定法+锁到参考点
是否需要特定数据序列	是	是	否
是否需要延时控制	否	是	是

过高速计数器统计出数据“0”、“1”的传输概率,从而实现随机数据序列时的微环调制器波长锁定。此方案首次实现了单片集成的微环调制器控制电路,但是高速计数器的设计非常关键,同时计数结果与光电探测器得到的光电流之间需要进行相应的延时控制。针对微环调制器的自动波长锁定,文献[51]展示了一种基于预编码的微环锁定方案,即通过对传输数据进行预编码,使其产生适合微环波长锁定的数据串,从而实现微环调制器的波长锁定,此方案整体上可以针对随机的数据传输序列进行锁定。值得一提的是,微环调制器最佳工作状态往往不在极值点,极值点处的调制带宽并不是最佳带宽,而是需要一定程度的解调谐(detuning)[52]来提高调制带宽。目前仍没有任何研究针对解调谐(detuning)状态进行微环波长锁定,所以此问题亟待进一步的解决。

实现微环谐振器波长锁定的同时也需要进一步降低电路功耗。文献[46-50]采用模拟信号对集成加热器进行控制,此时,大部分的功耗会耗费在与加热器相接的功率管上,所以这种控制方案效率是较低的,会耗费较大的功耗。研究[53]提出采用脉冲宽度调制(PWM)的方法对集成加热器进行控制。此方案在不考虑方波的上升/下降时间的前提下,可以实现100%的能量转换效率,即不存在静态功耗,只存在动态功耗,这将大大地降低功耗。但是此方案目前只在开环方案中尝试使用过,并没有在闭环方案中得到应用。综合传统DC-DC转换器的设计经验,PWM的闭环方案中有可能存在稳定性问题,需要得到进一步研究。微环谐振器的波长锁定环路与传统的电子线路类似,也存在速度与精度的问题,但是此类问题现在并没有很好的理论来分析和解释,仍需要进一步探索和研究。

4.2 多微环锁定电路

单微环波长锁定是多微环波长锁定的基础。多个微环通过协同工作,可以形成一个高性能的功能模块,实现单个器件难以实现的功能或者性能。多微环具有非常广泛的应用,特别是在数据中心的光传输应用领域。由多个微环级联组成的微环滤波器在通带平坦度和滚降等方面具有更加优异的性能[45,54-57];由多个微环谐振器组成的光开关阵列可以实现光信号的路由功能[58-59];由微环调制器组成的发射器和由微环谐振器组成的接收器可以实现密集波分复用(DWDM)传输系统[49,60-62]。这3种多微环功能模块有望在下一代数据中心的高速传输系统中得到应用。在以上多微环功能模块的应用中每个微环都需要进行波长锁定,从而维持整个系统处于最优的性能状态。目前单个微环波长锁定的控制电路系统

功耗较大,且控制电路面积是微环面积的几十甚至几百倍[50]。当多微环应用中的每个微环都需要一个波长锁定的控制电路时,整个数据传输系统的面积会急剧加大,而能量效率也将降低。

多微环波长锁定光电融合集成回路的重大挑战主要包括微环波长锁定控制方法可扩展性及系统稳定性等。通过复用控制电路或部分电路模块,及优化控制电路各个模块可以减小整体芯片的面积和功耗。另外,不同微环之间控制信号的串扰和微环间热串扰会影响控制电路的稳定性。

目前大多数多微环应用中,每个环都采用单独的控制器[63],也忽略了通道之间的联系和干扰。控制电路面积和功耗优化方面的研究还比较少。Ribeiro[64]提出双极性PWM控制方法,通过一个双极性PWM信号来控制两路微环的热调器,从理论上可以将控制电路驱动输出模块数量减少到微环的一半。但是该研究是使用开环控制方法,需要手动调节双极性PWM波的占空比来实现微环的调节。Dong[65]通过探测波分复用中多微环直通端的总功率来逐一调节每个微环,从而实现每个微环的波长锁定。这种方法能够大大减少多微环波长控制系统中光电二极管的数量,减小面积和功耗,在一定程度上提高系统的可扩展性。但是该方法只适用于多微环共用一个直波导的多微环结构。假定控制器工作频率维持不变,微环数量的增加会导致每个微环被控制器操作的频率减少,等效降低了每个微环对温度变化的波长稳定能力。

Wang[66]、谭旻[67]提出基于流水线时分复用的设计方案,并从理论和实验的角度阐述了该方法的有效性和可扩展性。图6为该方案的系统及结构。由于微环热调器的反应时间为百微秒量级,而控制电路单次调节时间为微秒量级,两者响应时间之间存在严重的不匹配,这是可以对控制电路进行时分复用的本质原因。控制电路在调节完某个微环的热调器后,在该微环的热调器响应完成之前,可以对其余微环的热调器进行调节。这种时分复用方案从理论上可以使用一个控制器同时调节上百个微环,这种控制方式大大降低整个系统控制电路的复杂性,减小整体芯片面积和功耗。

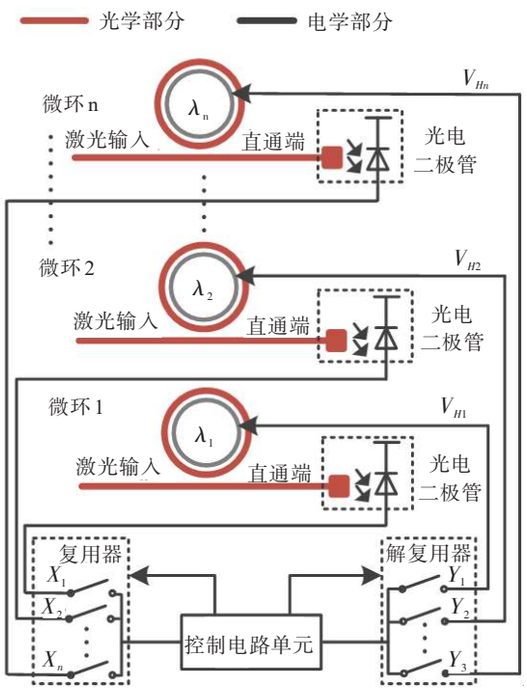


图6 基于流水线时分复用的多微环波长锁定架构

Fig.6 Wavelength locking of multiple microrings based on pipeline time-division-multiplexing scheme

表4为目前各种多微环波长锁定方法之间的比较。从中可以看出,不同方法对控制电路进行了不同程度的复用。除单微环-单控制电路的方法之外,其余3种方法均能不同程度地减少控制电路面积和功耗。

5 微环波长锁定的应用

由于微环的工作状态随温度、工艺偏差及输入激光波长等参数变化,为了获取稳定的性能,几乎所有基于微环的应用均需要对微环进行波长控制。微环在光生物传感[39]、全光信号处理[36-38]、数据中心数据传输[45,49,58]等领域均具有极大的应用前景。这里只考虑微环在数据中心数据传输领域的应用,包括模式复用/解复用、微环滤波器、光路由器及密集波分复用系统。

微环谐振器可以作为光学复用器/解复用器,实现光学模式复用。目前,光学波分复用(WDM)已经成为了光通信领域用来拓展通信带宽的重要技术,模式复用技术有潜力进一步增大通信带宽。如图7

表4 多微环波长锁定方法的比较

Table 4 Comparison of wavelength locking schemes for multiple silicon micro-rings

	单微环-单控制电路[63]	双极性PWM控制驱动[64]	单一监测控制方法[65]	基于流水线的时分复用方案[66]
复用控制电路部分	无复用	驱动输出模块	控制电路、光电二极管	控制电路
减少控制电路面积和功耗	否	是	是	是
控制类型	闭环	开环	闭环	闭环
控制方法可扩展性	不可扩展	可扩展	可扩展	可扩展性强

所示，文献[35]实现了3种模式×3种波长×10 Gbs-1的MDM-WDM链路，并观察到无差错传输（BER<10^{-12}）。但是一旦外界温度发生变化，微环的有效折射率将会随之发生改变，从而严重影响模式耦合效率，所以此类应用需要具有稳定工作状态的微环谐振器。

微环谐振器可以用来实现滤波功能。相比单微环滤波器，高阶微环滤波器在滚降、通带平坦度、消光比等方面性能更加优异。目前大部分高阶微环滤波器都是通过手动调节控制每个微环的热调器来获取平坦和较宽的通带[68-71]。Mak[54]使用板级控制电路来监测高阶微环滤波器的下载端光功率，通过自动逐一调节每个微环的热调器，来对每个微环进行波长控制。Hasitha Jayatilleka[45,55-57]对每个微环进行自动配置和波长锁定，从而获取优异的滤波性能。该研究采用IRPHs来同时监测和调节微环谐振器的谐振情况。监测信号通过数模转换器、计算机、模数转换器等组成的反馈环路逐一的调节每一个微环的IRPH。通过多次迭代控制后，实现所有微环谐振波长的对齐，使高阶微环谐振器达到优异的性能状态。该方法的IRPH需要大量前期校准来区分光电流和加热电流，不利于控制体系的集成。由于高阶微环滤波器的每个微环间距为几十纳米到几百纳米，微环之间有强烈的热串扰。这些热串扰会增加微环控制器的迭代次数，并降低控制电路对微环滤波器的波长锁定能力。Milanizadeh[34]提出的热固有模式分解技术减少了微环调节的迭代次数。但是当微环数量增多时，该研究需要每个微环热调器同时进行调节，这将使控制电路更加复杂，不利于控制电路的集成。

微环光路由器拥有转换时间快、功耗低等优点，有潜力在下一代数据中心中得到应用。相对一阶微环滤波器而言，高阶微环滤波器性能更加优异，大部分研究均使用高阶微环滤波器来组成光开关阵列，从而实现光路由的功能。图8为由两阶微环滤波器组成的4×4光开关。目前大部分高阶微环光开关阵列都是通过手动调节来实现信号通断的功能[72-75]。Zhu[58-59]提出了双微环阵列组成4×4的光路由，并通过方向耦合器提取每个微环的部分光，从而获取每个微环的谐振情况，再通过板级电路对每个微环依次进行调节，从而实现光路由的功能。

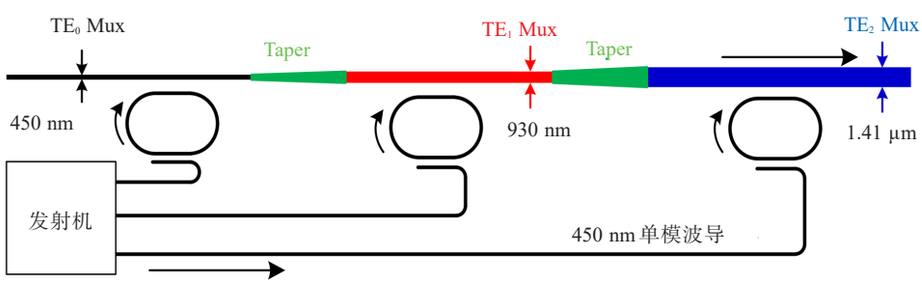


图7 由3个单微环构成的光学模式复用器

Fig.7 Optical mode multiplexer consisting of three single microrings

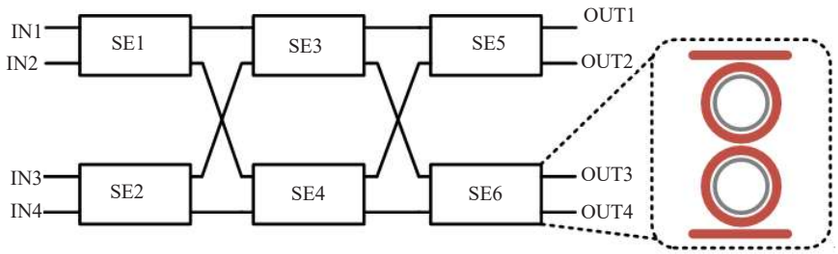


图8 由两阶微环滤波器构成的4×4光开关

Fig.8 4×4 optical switch consisting of two-order microring filter

如图9为DWDM收发器结构。目前能够实现微环自动波长锁定调节的密集波分复用系统并不多，Li[60]使用锁定到参考值的方式对单微环进行波长锁定，同时使用单微环-单控制电路的方式来控制所有的微环，实现了4×10 Gbps的数据传输，并留出了一个单独的通道进行时钟传输，用来同步发射器和接收器的时钟。在该研究基础上，Yu[61]、Li[62]使用同样的控制方式，通过优化部分电路模块的设计实现了4个通道25 Gbps的数据传输。Sun[49]在国际上率先实现了单片集成的密集波分复用系统，同时使用单微环-单控制电路的多微环控制方式，实现了11×8 Gbps的数据传输；然而该研究发射器和接收器时钟的同步是直接通过电缆相连[76]，时钟传输速度会受到限制。

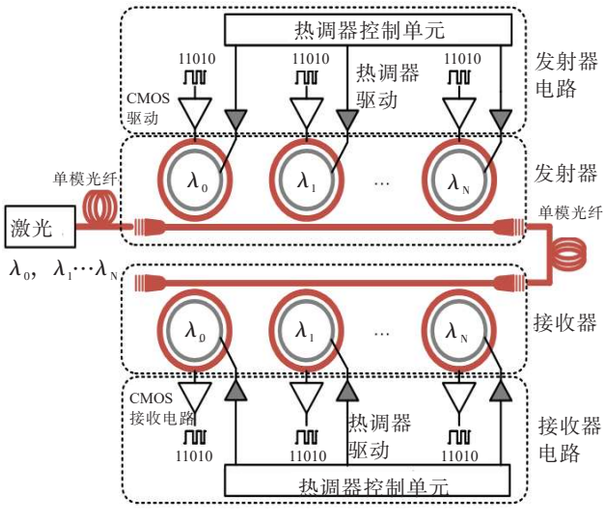


图9 DWDM收发器结构

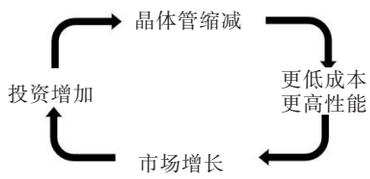
Fig.9 Architecture of dense-wavelength-division-multiplexing (DWDM) transceiver

6 展望光电融合未来

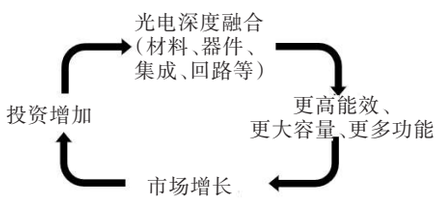
需求拉动、技术推动是集成电路的基本发展逻辑，晶体管持续缩减推动了这一发展逻辑的实现。回顾历史，集成电路在满足实用化的前提下，逐步扩大集成规模及提升性能，实现工艺、回路设计、仿真技术及应用等同步发展，形成一个良性循环可持续发展的产业链和生态系统。与集成电路发展初期类似，光电融合技术正逐步进入实用化阶段，需要推动集成技术、回路技术及应用等多方面共同发展，逐步扩大规模及提升性能。只有当技术进度带来的收益足以支持技术进步所需要的资金时，该技术产业才能够进入一个可持续发展的良性循环，形成一个与“摩尔定律”类似的技术推动和需求拉动之间的正向反馈环路。光电融合集成回路技术将加快迈向这一良性循环的进程。图10总结了“需求拉动、技术推动”发展逻辑在集成电路和光电融合集成回路中的应用。

融合(converging)将取代晶体管尺寸缩减(scaling)成为后摩尔时代信息产业的新引擎，光与电的融合将是实现这一转变的重要内容。目前光电融合正处于从物理结构融合到信号回路融合的转变阶段，面临着一些传统集成电路中不存在的新挑战，国际上也没有现成的技术路线可以借鉴。从某种意义上讲，光电融合集成回路的研究已经步入无人区，需要通过原始创新跨越无人区，实现超越式发展。老一辈科学家非常有远见和有前瞻性地指明了未来的大型集成系统必然是光子集成和微电子集成融合一体的综合系统，光子技术和电子技术最终必将融为一体[7]。国际上也有相关学者发出了光子和电子联合起来的号召[77]。如我国著名科学家王大珩院士

所说，若设光子为a，电子为b，它们相互作用的结果不是简单的a+b，而是a*b[78]。与电信号相比，光信号包含强度、相位、波长、偏振、时序等更多维度的信息。光子器件的类型也比电子器件更加多样化，用途也更加广泛。光电融合拥有巨大的发展空间，可以为光子和电子产业注入新的活力，帮助我国引领和驾驭信息技术智能化的发展浪潮。



（a）集成电路
（a）Integrated circuits



（b）光电融合集成回路
（b）Electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits

图10 “需求拉动、技术推动”发展逻辑在(a)集成电路和(b)光电融合集成回路中的应用

Fig.10 Technology push demand pull logic of (a) integrated circuits and (b) electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits

7 结 论

光电融合是后摩尔时代的重要技术发展方向，被普遍认为是推动信息产业可持续发展的有效方案。随着光电器件及其集成技术逐步走向成熟，我们即将迈入光电融合集成回路研究的下一阶段。目前光电融合技术进入了一个非常关键的转折阶段，引入集成电路的方法势必将加速光电融合技术的发展进程。

致谢：感谢黄德修教授对本文提出的宝贵修改建议！

参考文献

[1] KILBY J S. Invention of the integrated circuit IEEE[J]. IEEE Transactions on Electronic Devices, 1976, 23(7): 648-654.

[2] SCHALLER R R. Moore's law: past, present and future [J]. IEEE Spectrum, 1997, 34(6): 52-59.

[3] WU S Y, LIN C Y, CHIANG M C, *et al.* A 7nm CMOS platform technology featuring 4th generation FinFET transistors with a 0.027um² high density 6-T SRAM cell for mobile SoC applications[C]// IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE, 2016: 2.6.1-2.6.4.

[4] 王启明. 光电子集成回路(OEIC)——未来光通信产业发展的关键[J]. 中国科学院院刊, 1989(2): 107-112.
WANG Q M. Optical and electrical integrated circuits——the key to the future development of optical communication[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 1989(2): 107-112.

[5] 黄德修. 光纤通信发展中的一些规律认识(II)[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(6):76-82.
HUANG D X. Review on some development laws in optical fiber communication (II)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(6): 76-82.

[6] 王启明. 信息高科技领域中的半导体光电子学[J]. 半导体学报, 1998, 19(10): 2-9.
WANG Q M. Semiconductor optoelectronics in the field of information high technology[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1998, 19(10): 2-9.

[7] 王启明, 周炳琨. 展望21世纪Si基光子学的发展[J]. 光电子技术与信息, 2000, 13(2): 1-6.
WANG Q M, ZHOU B K. Prospect of the development of Si- based photonics in 21 centenary Optoelectronic Technology & Information, 2000, 13(2): 1-6.

[8] 王启明. 半导体光子学[J]. 固体电子学研究与进展, 1995, 15(3): 205-213.
WANG Q M. Semiconductor photonics[J]. Research & Progress of SSE, 1995, 15(3): 205-213.

[9] 王启明. 半导体集成光子学的研究与进展[J]. 自然科学进展, 1997, 7(2): 10-15.
WANG Q M. Research and progress of semiconductor integrated photonics[J]. Progress in Natural Science, 1997, 7(2): 10-15.

[10] 王兴军, 苏昭棠, 周治平. 硅基光电子学的最新进展[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2015, 45(1): 15-45.
WANG X J, SU Z T, ZHOU Z P. Recent progress of silicon photonics[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2015, 45(1): 15-45.

[11] 祝宁华, 李明, 郝跃. 光电子器件与集成技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016, 46(8): 1156-1174.

微纳电子2019(copy) 第52页 共166页 C M Y K 2019-11-25 15:59:32

ZHU N H, LI M, HAO Y. Optoelectronic devices and integration technologies[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(8): 1156-1174.

[12] TAN M. Advanced Power Integrated Circuits Course Notes[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

[13] SILVERSTONE J W, BONNEAU D, O'BRIEN J L, *et al.* Silicon quantum photonics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 390-402.

[14] YAO Z S, WU K Y, TAN B X, *et al.* Integrated silicon photonic microresonators: emerging technologies[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018, 24(6): 1-24.

[15] MARCATILI E A J. Bends in optical dielectric guides [J]. Bell System Technical Journal, 1969, 48(7): 2103-2132.

[16] WEBER H P, ULRICH R. A thin-film ring laser[J]. Applied Physics Letters, 1971, 19(2): 38-40.

[17] STOKES L F, CHODOROW M, SHAW H J. All-single-mode fiber resonator[J]. Optics Letters, 1982, 7(6): 288.

[18] WALKER R G, WILKINSON C D W. Integrated optical ring resonators made by silver ion-exchange in glass[J]. Applied Optics, 1983, 22(7) : 1029-1035.

[19] RAFIZADEH D, ZHANG J P, HAGNESS S C, et al. Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 216-nm free spectral range[J]. Optics Letters, 1997, 22(16): 1244.

[20] LITTLE B E, FORESI J S, STEINMEYER G, et al. Ultra-compact Si-SiO_2microring resonator optical channel dropping filters Technology[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(4): 549-551.

[21] 王大珩. 激光与光电子技术前程无量——在"全国新型激光器及其应用暨激光产业发展高峰论坛"开幕式上的讲话[J]. 激光与红外, 2004, 34(3):3-4.
WANG D H. The infinite future of laser and optoelectronic technology[J]. Laser and Infrared, 2004, 34(3): 3-4.

[22] BOGAERTS W, XING Y, KHAN U. Layout-aware variability analysis, yield prediction, and optimization in photonic integrated circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(5): 1-13.

[23] GRAY P, HURST P J, LEWIS S H, et al. Analysis and design of analog integrated circuits[M]. Wiley, 2001.

[24] RAZAVI B. RF microelectronics[M]. Pearson Education, 2012.

[25] RABAEY J M, CHANDRAKASAN A P, NIKOLIC B. Digital integrated circuits 2nd Edition[M]. Prentice hall Englewood Cliffs, 2002.

[26] PAYDAVOSI N, VENUGOPALAN S, CHAUHAN Y S, et al. BSIM—SPICE models enable FinFET and UTB IC designs[J]. IEEE Access, 2013, 1: 201-215.

[27] MACMILLEN D, CAMPOSANO R, HILL D, et al. An industrial view of electronic design automation[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2000, 19(12): 1428-1448.

[28] YE Y, SPINA D, BOGAERTS W, et al. Baseband macromodeling of linear photonic circuits for time-domain simulations[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1364-1373.

[29] YE Y, SPINA D, XING Y, et al. Numerical modeling of a linear photonic system for accurate and efficient time-domain simulations[J]. Photonics Research, 2018, 6(6): 560.

[30] SORACE-AGASKAR C, LEU J, WATTS M R, et al. Electro-optical co-simulation for integrated CMOS photonic circuits with VerilogA[J]. Optics Express, 2015, 23 (21): 27180.

[31] MING D, WANG Z, TAN M. A verilog-A compact model for silicon micro-ring supporting fast thermal-electronic-photonic co-simulation[C] // Int. Conf. on Information Optics and Photonics (CIOP), 2018.

[32] SHICHMAN H, HODGES D A. Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1968, 3 (3): 285–289.

[33] BOGAERTS W, CHROSTOWSKI L. Silicon photonics circuit design: methods, tools and challenges[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(4): 1700237.

[34] MILANIZADEH M, AGUIAR D, MELLONI A, et al. Canceling thermal cross-talk effects in photonic integrated circuits[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1325-1332.

[35] LU L W, OPHIR N, CHEN C P, et al. WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip[J]. Nature Communications, 2014, 5(2): 3069.

[36] MIKROULIS S, SIMOS H, RODITI E, et al. 40-Gb/s NRZ and RZ operation of an all-optical AND logic gate based on a passive InGaAsP/InP microring resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(3): 1159-1164.

[37] STAMPOULIDIS L. Microring-resonator-assisted, all-optical wavelength conversion using a single SOA and a second-order $Si_3N_4-SiO_2$ ROADM[J]. Journal of Light-

wave Technology, 2010, 28(4): 476-483.

[38] DING Y H, HU H, GALILI M, et al. Generation of a 640 Gbit/s NRZ OTDM signal using a silicon microring resonator[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6471.

[39] GAVELA A F, GARCÍA D G, RAMIREZ J C. Last advances in silicon-based optical biosensors[J]. Sensors, 2016, 16(3): 285.

[40] GUHA B, CARDENAS J, LIPSON M. Athermal silicon microring resonators with titanium oxide cladding[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26557-26563.

[41] GUHA B, KYOTOKU B B C, LIPSON M. CMOS compatible athermal silicon microring resonators[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3487-3493.

[42] YANG S. Thermal stabilization of a microring resonator using bandgap temperature sensor[C]// Optical Interconnects Conference, 2015: 44-45.

[43] SAEEDI S, EMAMI A. Silicon-photonic PTAT temperature sensor for micro-ring resonator thermal stabilization [J]. Optics Express, 2015, 23(17): 21875.

[44] GRILLANDA S, CARMINATI M, MORICHETTI F, et al. Wavelength locking of a silicon microring resonator assisted by ContactLess integrated photonic probe[C]// 11th International Conference on Group IV Photonics (GFP). IEEE, 2014: 124–125.

[45] JAYATILLEKA H, SHOMAN H, BOECK R, et al. Automatic configuration and wavelength locking of coupled silicon ring resonators[J]. Light Technology, 2018, 36 (2): 210-218.

[46] PADMARAJU K, LOGAN D F, SHIRAISHI T, et al. Wavelength locking and thermally stabilizing microring resonators using dithering signals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3): 505-512.

[47] PADMARAJU K, CHAN J, CHEN L, et al. Thermal stabilization of a microring modulator using feedback control[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 27999-28008.

[48] PADMARAJU K, LOGAN D F, ZHU X, et al. Integrated thermal stabilization of a microring modulator[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14342.

[49] SUN C. A 45 nm CMOS-SOI monolithic photonics platform with bit-statistics-based resonant microring thermal tunin[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51 (4): 893-907.

[50] AGARWAL S, INGELS M, PANTOUVAKI M, et al. Wavelength locking of a Si ring modulator using an integrated drop-port OMA monitoring circuit[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51(10): 2328-2344.

[51] 谭旻. 一种用于微环调制器的预编码闭环反馈热控制方法及系统: CN201711029849.1[P]. 2017-10-30.
TAN M. A pre-coding closed-loop feedback thermal control method and system for microring modulators: CN201711029849.1[P]. 2017-10-30.

[52] DUBÉ-DEMERS R, LAROCHELLE S, SHI W. Ultrafast pulse-amplitude modulation with a femtojoule silicon photonic modulator[J]. Optica, 2016, 3(6): 622.

[53] ZECEVIC N, HOFBAUER M, ZIMMERMANN H. Integrated pulsewidth modulation control for a scalable optical switch matrix[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7 (6): 1-7.

[54] MAK J C C, SACHER W D, MIKKELSEN J C, et al. Automated calibration of high-order microring filters [C]// 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). IEEE, 2015: 1-2.

[55] JAYATILLEKA H, BOECK R, ALTAHA M, et al. Automatic tuning and temperature stabilization of high-order silicon vernier microring filters[C]// 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2017: 1-3.

[56] JAYATILLEKA H, MURRAY K, GUILLÉN-TORRES M Á, et al. Wavelength tuning and stabilization of microring-based filters using silicon in-resonator photoconductive heaters[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 25084-25097.

[57] JAYATILLEKA H, BOECK R, MURRAY K, et al. Automatic wavelength tuning of series-coupled vernier racetrack resonators on SOI[C]// Optical Fiber Communication Conference(OFC). OSA Publishing: 2016: 1-3.

[58] ZHU Q M, JIANG X H , YU Y P, et al. Automated wavelength alignment in a 4 × 4 silicon thermo-optic switch based on dual-ring resonators[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 99.

[59] ZHU Q M, JIANG X H , CAO R Y, et al. Wide-range automated wavelength calibration over a full FSR in a dual-ring based silicon photonic switch[C]// Optical Fiber Communication Conference. OSA Publishing: 2018: 1-3.

[60] LI C, BAI R, SHAFIK A, et al. Silicon photonic transceiver circuits with microring resonator bias-based wavelength stabilization in 65 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(6): 1419-1436.

[61] YU K Z, LI C, LI H, et al. A 25 Gb/s hybrid-integrated silicon photonic source-synchronous receiver with microring wavelength stabilization[J]. IEEE Journal of Sol-

微纳电子2019(copy) 第54页 共166页 C M Y K 2019-11-25 15:59:37

id-State Circuits, 2016, 51(9): 2129-2141.

[62] LI H, XUAN Z, TITRIKU A, et al. A 25 Gb/s, 4.4 V-swing, AC-coupled ring modulator-based WDM transmitter with wavelength stabilization in 65 nm CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(12): 3145-3159.

[63] GAZMAN A, BROWNING C, ZHU Z, et al. Automated thermal stabilization of cascaded silicon photonic ring resonators for reconfigurable WDM applications[C]// European Conference and Exhibition on Optical Communication(ECOC). 2017: 1-3.

[64] RIBEIRO A, BOGAERTS W. Thermo-optical phase shifter with integrated diodes for multiplexed control [C]// Optical Fiber Communication Conference. 2018: Th2A.4.

[65] DONG P, GATDULA R, KIM K, et al. Simultaneous wavelength locking of microring modulator array with a single monitoring signal[J]. Optics Express, 2017, 25 (14): 16040-16046.

[66] WANG Z C, YU Y, XIAO X, et al. A time-division-multiplexing scheme for simultaneous wavelength locking of multiple silicon micro-rings[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems, IEEE, 2018: 1-4.

[67] 谭旻. 一种用于片上集成光子器件的时分复用闭环反馈热控制方法: CN201710520282.1[P]. 2017-06-30.
TAN M. A time-division multiplexing based closed-loop thermal control method for on-chip integrated photonic devices: CN201710520282.1[P]. 2017-06-30.

[68] ONG J R, KUMAR R, MOOKHERJEA S. Ultra-high-contrast and tunable-bandwidth filter using cascaded high-order silicon microring filters[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(16): 1543-1546.

[69] LUO X S, SONG J F, FENG S Q, et al. Silicon high-order coupled-microring-based electro-optical switches for on-chip optical interconnects[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(10): 821−823.

[70] DONG P, FENG N N, FENG D Z, et al. GHz-bandwidth optical filters based on high-order silicon ring resonators[J]. Optics Express, 2010,18(23): 23784.

[71] CHEN P, CHEN S, GUAN X, et al. High-order microring resonators with bent couplers for a box-like filter response[J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6304.

[72] IKEHARA H, GOTO T, KAMIYA H, et al. Hitless wavelength-selective switch based on quantum well second-order series-coupled microring resonators[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6377.

[73] DASMAHAPATRA P, STABILE R, WILLIAMS. Third-order ring-resonator based InP Switch Matrix[C]// International Conference on Photonics in Switching (PS). 2015: 220-222.

[74] STABILE R, DASMAHAPATRA P, AND WILLIAMS K A. First 4×4 InP switch matrix based on third-order micro-ring-resonators[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2016: 1-3.

[75] SHERWOOD-DROZ N. Optical 4x4 hitless Silicon router for optical Networks-on-Chip (NoC): erratum[J]. Optics Express, 2008, 16(23):19395.

[76] SUN C. Silicon-Photonics for VLSI Systems[D] Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2015.

[77] MASHANOVICH G Z. Electronics and photonics united [J]. Nature, 2018, 556(19): 316−318.

[78] 黄德修. 光信息科学与技术[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2002, 16(2): 48-51.
HUANG D X. Optical information science and technology[J]. Journal of Wuyi University (Natural Science Edition), 2002, 16(2):48-51.