

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250322.

专题:纪念创刊50周年

谭旻. 光电融合芯片:基本概念与未来展望[J]. 光通信研究, 2025(6): 250322.

Tan M. Electronic-Photonic Heterogeneously-Converging Integrated Circuits: Basic Concepts and Future Prospects [J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250322.

光电融合芯片:基本概念与未来展望

谭旻

(华中科技大学 a. 集成电路学院; b. 武汉光电国家研究中心, 武汉 430074)

摘要: 光电融合芯片是集成光子技术与集成电路深度融合的产物,代表后摩尔时代信息产业的重要技术方向。文章系统阐述了光电融合芯片的基本概念,强调其从“分离”到“融合”的本质特征,不仅体现在物理制备层面的集成,更包括信息处理层面的融合。通过梳理相关概念与术语体系,并借鉴集成电路的技术演进经验,文章展望了光电融合芯片的未来发展,特别是其设计发展趋势,以期为该领域的研究与产业化提供清晰的概念框架和发展路径参考。

关键词: 光电融合芯片; 光子集成; 集成电路; 物理集成; 信息处理; 闭环反馈控制

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A

Electronic-Photonic Heterogeneously-Converging Integrated Circuits: Basic Concepts and Future Prospects

TAN Min

(a. School of Integrated Circuits; b. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits, the deep convergence of photonic integration technology and integrated circuits, represent a pivotal technological direction for the information industry in the post-Moore's law era. This paper systematically elaborates on the fundamental concepts of electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits, emphasizing their essential characteristic of transitioning from a “segregated” to a “converging” paradigm. This shift is manifested not only in physical integration at the fabrication level but, more profoundly, in convergence at the information processing level. By clarifying the relevant conceptual and terminological framework, and by drawing on the technology evolution experience of integrated circuits, this paper envisions the future development of electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits, particularly the design development trends. It aims to provide a clear conceptual framework and developmental pathway reference for research and industrialization in this field.

Key words: electronic-photonic heterogeneously-converging integrated circuits; photonic integration; integrated circuits; physical integration; information processing; closed-loop feedback control

0 引言

在过去的半个多世纪中,微电子技术作为信息产业的核心驱动力,其发展主要遵循摩尔定律所预示的晶体管尺寸持续缩减路径。然而,该技术路径目前正面临两大严峻挑战:一是逼近原子尺度的物理学极限,二是急剧攀升的研发与制造成本。这两大因素共同导致以尺寸缩减为核心的传统模式已不可持续,摩尔定律正趋于终结。以光子为信息载体的集成光子技术,因其高带宽、低延迟与低功耗的天然优势,为后摩尔时代的信息处理注入了新的活力。然而,光子系统在控制、存储与逻辑运算方面的内在

缺陷,使其无法脱离电学系统独立工作。历史上,集成电路与集成光子沿各自轨道独立发展,形成了“分离”发展的范式,严重制约了系统性能的进一步提升。推动光学与电学在芯片层面从“分离”走向“融合”,不仅是发挥光子潜力、突破现有分离发展范式局限的必然要求,更是引领新一代信息产业发展的主流技术路径。本文旨在厘清光电融合芯片的核心概念与术语体系,并展望其未来发展趋势。

1 融合与分离

融合与分离是用于描述不同属性事物之间关系紧密程度的术语。分离是相对于融合而言的,指的

收稿日期:2025-10-01; 修回日期:2025-10-29; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2024YFB2807601)

作者简介:谭旻(1985-),男,湖南益阳人。研究员,博士,主要研究方向为光电融合芯片设计及其建模仿真技术。

通信作者:谭旻,研究员。E-mail:mtan@hust.edu.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

是两个事物之间存在较弱或有限的联系,而非完全无关联(完全无关联则缺乏研究价值)。若两个事物之间的关系呈现单向、静态、粗粒度且彼此不共享内部信息的特征,可被视为一种分离关系;反之,若关系表现为双向、动态、细粒度并充分共享内部信息,则可认定为融合关系。融合既包括物理制备层面的融合,也涵盖信息处理层面的融合。物理制备意义上的融合包括不同材料与器件通过一体化制备工艺实现整合;信息处理意义上的融合,则是指不同信息属性的事物通过一体化设计形成有机的信息系统。融合还具有不同的层次与范围。例如,物理制备意义上的融合可划分为原子级和分子级等不同层次,且更小范围的融合构成更大范围融合的子集。相较于不同类型电子器件之间的融合,光电融合所覆盖的范围更为广泛。

融合不仅是一个理论概念,更是一种社会、工程及产业实践。人类社会组织与技术发展的历史,本质上是一部从分离逐步走向融合的演进史。如图1所示,集成电路、存算一体、社会组织以及光电融合等都是融合发展的实例。集成电路可视为无源器件与有源器件的融合,存算一体则是计算与存储功能的融合。相较于将男性群体与女性群体相互隔离的

落后生产关系,现代社会分工是男性和女性交流更为紧密融合的生产关系。类似地,集成电路技术与集成光子技术也正逐渐从分离走向融合。相较于分离,融合通常意味着更精细的设计粒度、更充分的内部信息分享以及更多的交流互动,从而必然导致系统性能与功能的显著差异。分离可被视为融合的一个特定子集,因此融合总是能够实现比分离更优的性能和更丰富的功能。分离所能实现的功能,融合同样可以实现,但反之则不一定成立。具体而言,所有通过粗粒度物理制备实现的器件性能,均可通过更细粒度的物理制备工艺实现,并有望进一步提升性能;所有粗粒度的信息处理方案,也都能通过更细粒度的信息处理方式实现,且往往具备性能提升的潜力。在给定的物理制备粒度前提下,若能以最细粒度进行信息处理,则有望在既定物理约束条件下实现最优的系统性能。需要指出的是,采用更细粒度进行物理制备通常会增加制造成本(例如需要更昂贵的制造设备);而以更细粒度进行信息处理,通常主要涉及软件层面的调整,所需代价相对较小。就光电融合芯片而言,以最细的信息粒度进行信号处理,有望以极小的代价实现远超分离设计范式的整体性能。

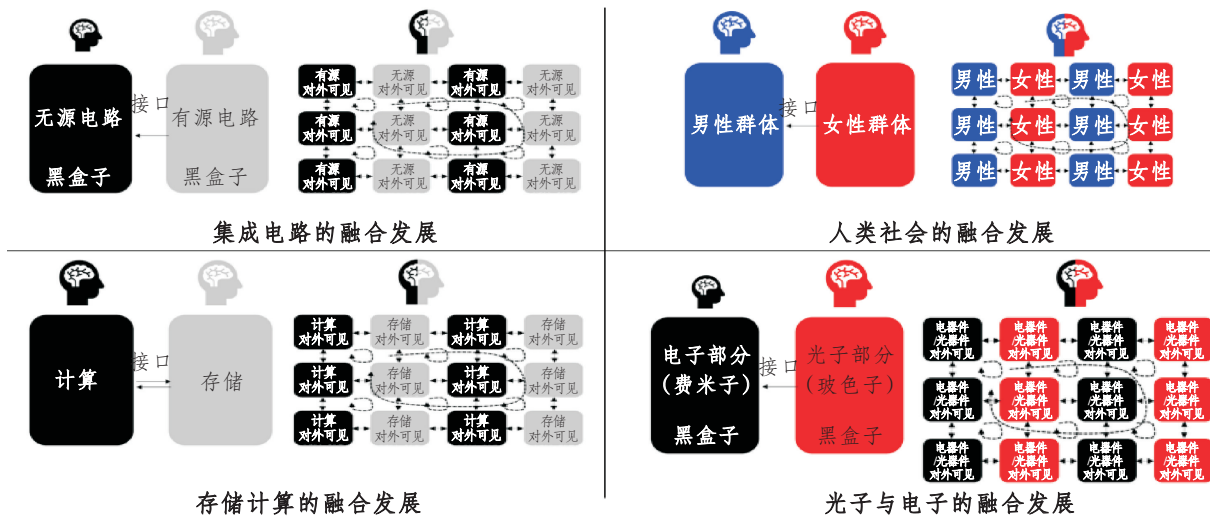


图1 不同的分离和融合发展范式

Figure 1 Diverse paradigms of segregated and converging development

2 芯片相关概念与术语

传统意义上,“芯片”和“集成电路”通常被认为是等价的概念。集成电路或芯片,是指通过一系列特定的加工工艺,将晶体管和二极管等有源器件,以及电阻器和电容器等无源元件,按照设计要求的电路(Circuits)相互连接,并“集成”到半导体材料(如

硅或砷化镓等化合物)制成的基片上,再封装于外壳内,以实现特定功能的电路或系统。芯片技术的核心内容主要包括物理制备和信息处理两个方面。其中,器件的制备与封装属于物理制备的范畴,而电路的互连则属于信息处理的范畴。需要特别指出,集成电路更为精准的翻译应为“集成回路”。从语义的角度来看,“Circuits”更准确的译法是“回路”而非

“电路”,因为该术语本身不局限于电学领域。随着技术的不断发展,芯片的概念逐渐拓展到光芯片、光电融合芯片以及量子芯片等。这些新型芯片借鉴或仿照了集成电路的物理制备技术,进一步发展为更广泛的集成化器件和功能模块。然而需要注意的是,目前光芯片和量子芯片尚未完全借鉴集成电路成熟的信息处理技术,没有厘清电信号所扮演的角色,也没有相对应的概念和术语。如果缺少电学配套,光芯片将难以独立实现完整的信息处理功能。为支撑光电融合等新型芯片的信息处理研究,我们迫切需要发展相应的概念及术语。

3 光电相关概念与术语

虽然光学(Optics)、光子学(Photonics)、量子电子学(Quantum Electronics)、量子光学(Quantum Optics)、光电子学(Optoelectronics)、电光子学(Electro-Optics)、光电融合(Electronics-Photonics Convergence)及光波技术(Lightwave Technology)等术语被广泛使用,然而人们对这些术语所代表的具体含义并未达成一致^[1]。我们试图根据文献中的相关描述厘清不同术语的定义和关系。

光学和光子学之间存在一定的交集,但是两者边界亦随学科演进而逐渐模糊。广义上讲,光学通常被认为代表自由空间光学及波导光学等相关内容,并包括干涉、衍射、成像、统计光学及光子光学等具体课题。光子学通常被认为包括与光、与物质互相作用的相关内容,强调以光子为信息或能量载体的器件与系统层面的研究。电光子学通常指电学效应扮演重要角色的光器件,比如激光器、电光调制器及光开关等。电子学是关于真空及物质中电荷流控制的研究,而光子学则是关于真空及物质中光子控制的相关研究。很显然光子学和电子学存在交集,光子的控制需要电参与,而光子也可以控制电子。光电子学通常指与光相关但是本质上为电学属性的器件和系统,比如发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)、液晶显示器件及光电探测器阵列等。光电子学可以被认为是光子学的一个子集。量子电子学是指与光、与物质互相作用相关的器件和系统,比如激光器、用于光放大和混频的非线性光器件^[2]。量子光学研究光的量子性和相干性方面的内容。光波技术则是指与光通信和光信号处理相关的器件和系统。

集成光学(Integrated Optics)一词在1969年首次被Bell实验室的Miller E Stewart所创造^[3],有文献认为集成光学和集成光子(Integrated Photonics)

表达同一含义^[2],是指在平面衬底和表面制备集成的波导和器件,是光子学的一个分支^[4],可以认为是光子学的集成版本。通过集成的方式,复杂的光路可以像集成电路信号处理和传输一样对光参数进行处理和传输。集成光学现在主要指在玻璃、二氧化硅及铌酸锂等透明衬底上的回路^[5]。典型的集成光学包括铌酸锂开关阵列、滤波器阵列和高速调制器等。国际上第1个关于集成光学的主题会议于1972年由美国光学协会组织召开^[6]。光电子集成回路(Opto-Electronic Integrated Circuits, OEIC)包括片上晶体管和光电器件,采用金属连接,但是不包括波导^[5]。1978年OEIC首次被试验验证,包含1个光电二极管及1个耿氏电子二极管^[6]。需要说明的是文献中并没有形成对OEIC的统一理解,有学者认为OEIC是光子和电子集成在同一衬底的芯片^[7]。光子集成回路(Photonic Integrated Circuits, PIC)则强调片上激光及片上波导连接,而没有金属连接^[8]。有学者认为光子芯片仅包括无源光器件^[9]。光子芯片借用了电子学发展的路径,利用类似的技术和方法,将大型光学元器件集成到了一个小小的基片上,其重要特征就是仅仅利用光子作为信息载体,不需要电子的参与^[9]。

光电全集成回路(Electronic-Photonic Integrated Circuits, EPIC)是美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)所资助的一个项目^[10],其目标是实现光子器件在微电子工艺平台的制备,主要涉及光电全集成制备工艺方面的研究。文献中的EPIC也大多是指单片工艺制备,而非回路设计方面的内容。光电融合有不同的物理制备方式,可以在同一个衬底上单片集成光子器件和电子器件,也可以通过封装实现光子器件和电子器件的集成。从回路设计的视角来看,单片集成或通过封装的形式实现混合集成两种方式并无太大差异。从这个意义讲,我们需要一个类似集成电路的新术语来指代光子器件和电子器件的互连,即光电融合芯片。文献^[11]采用Electronic-Photonic Heterogeneously-Converging Integrated Circuits (EPHIC)作为光电融合集成回路或光电融合芯片的英文术语。光电融合是一个长期异质融合的演进过程,Heterogeneously-Converging是对这个概念精准的英文描述。

4 光电融合芯片概念与术语

由于光本身并不具备实用化的全光控制和存储

能力,任何实用化的光子系统必然有电的参与,不管是传统光电系统还是新兴的光电融合芯片,电的参与均是必须的。两者的区别并不在于是否有电的参与,而在于光与电相结合的方式。光电融合集成电路或光电融合芯片是指通过一系列特定的加工工艺,将晶体管、光电二极管等电子和光子有源器件与电阻器、波导等电子和光子无源元件,按照一定的回路互连,“集成”在半导体(如硅或砷磷等化合物)晶片上,封装在一个外壳内,执行特定功能的回路或系统^[11-14]。

光电融合芯片包括物理制备融合和信息处理融合两个方面。光电融合物理制备主要涉及光与电一体化制备方面的内容,而光电融合信息处理主要包括光与电一体化设计的器件互连及系统优化方面的内容。从香农信息第一性原理出发,光电融合信息处理更加严谨的定义是指在光参数产生、处理、存储、探测和呈现等动态过程中,通过光与电互相作用实现光参数不确定性消除的科学及技术的总和。任何信息系统均需要物质实体的支持,物质存在先于信息存在,芯片的物理制备是其实现任何信息功能的前提。芯片的制备不是随意制备,而是人类有目的地改造自然的结果。既然是用于实现人的目的,则需要在制备前做好规划和设计,也就是芯片设计。芯片设计过程就是设计人员在整个设计参数空间内通过参数的反复迭代寻求优化解,直至达到设计目标的过程。具有一定复杂度的现代系统设计皆需要借助计算机辅助设计软件,从而加快以上反馈迭代的设计进程。

就光电融合物理制备而言,分立光学元件正慢慢被集成器件所替代,而电学部分也慢慢走向集成,逐步形成由集成光子和集成电路一体化集成的光电融合物理制备方案。集成光子和集成电路在同一个衬底的单片集成是光电融合芯片的终极方案。光与电的物质融合是一个长期演进的发展过程,一方面受限于基本科学原理,例如硅基材料因属于间接带隙半导体难以发光;另外一方面受经济因素影响,即便能够实现物质制备,如成本太高则难以大规模实用化,从而失去经济上的意义。器件集成与封装是光电融合物理制备的核心内容。光电融合芯片采用集成的光芯片和电芯片(也就是集成电路),其物理制备可以分为单片集成和封装集成两种主要方式。

①单片集成:目前还处于起步阶段,虽有工艺厂实现了原型,但是还不成熟,特别是激光器的集成极具挑战性。实用化的激光器目前还难以与其他部件

一起形成单片集成,文献中的光电单片全集成芯片通常需要依赖外部的激光器。实际上目前并没有严格意义上完全能够独立工作的光电单片全集成芯片。从实用角度出发,激光器未必需要完全集成,外置方案也不失为可以商用的可行方案。可行性初步验证、成本、可靠性和规模化制备是需要长期攻克挑战。

②封装集成:光芯片和电芯片的分别制备是封装集成的前提。为了实现封装后的性能优化,在光芯片和电芯片设计之初必须考虑封装对性能的影响。封装集成在其他领域出现过,比如三维存储器,已有基础设施可以复用到光电融合芯片。封装集成首先需要高质量的光芯片,在此基础上需要针对光芯片的特点定制化地进行封装性能的优化,既需要考虑物理制备性能,也需要考虑经济因素。比如光纤封装耦合就是其中的难点之一,光子引线(Photonic WireBond, PWB)是当前这方面的创新技术。

就光电融合信息处理而言,传统分离设计与融合设计存在显著差别,但二者之间也存在难以严格界定的过渡区域,使得严格区分两者变得困难。一般而言,当光与电之间采用开环级联方式,并通过人工方法实现接口对接和设计迭代时,可将其归类为传统分离设计。反之,如果光与电之间存在闭环互连且是通过一体化设计的方式实现迭代优化,则可以被认为是融合设计。服务于光电融合物理制备的光芯片与电芯片的独立设计,同样是光电融合芯片设计的重要环节之一。光电融合信息处理或光电融合芯片设计的核心内容包括光电融合芯片设计方法及其设计工具等。图2比较了4种不同类型的芯片设计:光芯片设计、集成电路设计、光电分离设计以及光电融合芯片设计。如图2(a)所示,集成电路设计工程师利用计算机辅助设计软件进行持续迭代,直至满足设计要求。同样,如图2(b)所示,光芯片设计也需要在专用设计软件的辅助下,通过多次迭代来达到设计目标。值得注意的是,集成电路设计主要关注器件互连,而光芯片设计则以物理器件设计为主,且采用不同集成电路设计的物理设计软件。对于光电分离设计的系统而言,光学部分与电学部分通常分别独立设计。设计流程一般是先完成光学部分的设计,光学工程师紧接着给出接口参数,随后由电子工程师根据接口参数完成电学部分设计及验证。这种模式下,光学部分与电学部分之间的交流通常是单向的,仅提供静态接口信息,缺乏充分互

动,并且光子系统与电子系统的颗粒度都较粗,内部信息互不透明。如图 2(c)所示,在光电分离设计中,光学工程师通常根据调研结果为电子工程师设计接口参数,电子工程师再照此参数完成电芯片设计。然而,即使光芯片与电芯片各自达到局部最优,也并不意味着整体系统性能能达到全局最优。光电融合设计通过更小颗粒度的模块参与整体设计,光学部分与电学部分之间存在更充分的信息交互和动态双向协作,从而以全局视角实现系统优化。如图 2(d)所示,在光电融合芯片设计中,设计人员可以借助光器件的仿真模型实现光电协同仿真,为光电一体化设计提供有力支持。

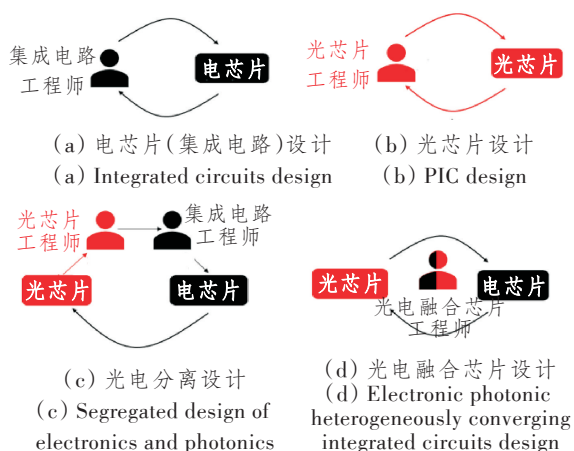


图 2 不同类型的设计

Figure 2 Different types of designs

光电融合建模与仿真工具是光电融合芯片设计不可或缺的重要基础。传统分离设计的主要局限性包括以下几点:

①电子工程师难以获取完整的光芯片信息,在信息不完整的情况下难以做出最优的电子芯片;

②分离设计下,电子工程师与光子工程师通过人工形式进行反馈与迭代,沟通成本高且容易出错,同时难以处理光电之间存在的反馈互动问题;

③光子工程师与电子工程师只能掌握系统的局部信息,这种分离式设计阻碍了光电融合闭环稳定性控制等需要光与电一体化全局信息的研究;

④缺乏统一的软件平台与工具,设计效率低下,且难以保证设计的正确性。

光电融合设计依托新兴的光子器件紧凑模型及光电协同仿真方法,从全局与动态的视角,以更小颗粒度实现光子器件与电子器件的回路级互连,实现更粗颗粒度器件互连及仅凭改进物理制备无法实现的功能和性能。优化的光电融合基础单元为更高层次的模块设计奠定了坚实基础。

5 不同相关概念的联系与区别

5.1 光电融合与光电融合芯片

从语义上看,光电融合与光电融合芯片都强调光学与电学的一体化,其核心理念都在于实现两种技术的高效“融合”。然而,“光电融合”这一术语具有更广泛的内涵,他不仅涵盖了芯片级的集成,还包括其他形式的融合,例如衍射光栅与电子芯片之间的结合;而“光电融合芯片”则专指利用半导体工艺将光子器件与电子器件集成在同一芯片上所实现的融合技术。从发展历史的角度来看,最早提出的光电融合概念便是以芯片级融合为基础,即通过半导体工艺整合光子和电子器件,实现更紧密的小型化系统。因此,在技术发展的初期,两者实际上指代同一种实践过程,只是随着应用范围的扩展和技术细化,“光电融合”逐步发展为一个更具包容性的概念,而光电融合芯片则依然是这一领域中最关键和常见的形式。在习惯用法上,由于光电融合芯片在实际应用中的广泛使用和重要性,其名词使用频率和应用场景远高于其他光电融合的形式。对于一些次要或不常见的应用领域,严格区分这两个术语往往没有必要,甚至在某些文献中两者常常可以互换使用。然而,在需要精确定义光电融合方式与技术细节时,区分“光电融合”广义概念和“光电融合芯片”的具体实现方式则显得尤为重要。总的来说,光电融合与光电融合芯片之间既有区别也有联系。两者的区别主要在于适用范围和术语涵义:前者广义涵盖各种光学与电学一体化结合的形式,后者专指基于半导体工艺实现的芯片级融合。在半导体芯片范畴内,光电融合芯片和光电融合是等价概念。本文主要讨论半导体芯片范畴内的光电融合,不对以上两个术语进行区分。

5.2 硅光与光电融合

硅光是硅基光电子的简称,对应的英文为 Silicon Photonics。硅光研究可以追溯到上世纪 80 年代,起初聚焦于硅基波导的研究^[15-16]。如今,硅光已成为一个常用词汇,但其定义尚未达成广泛共识。硅光与光电融合密切相关,但两者之间也存在显著区别。

硅光与硅光芯片大致可视为同义。比利时根特大学的 Bogaerts 教授和 Baets 教授,以及英属哥伦比亚大学的 Chrostowski 教授认为,硅光技术是利用互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺实现片上大规模

光学功能集成的技术^[17-18]；意大利特伦托大学的Pavesi提出，硅光技术是指采用主流微电子工艺制造光器件的技术^[19]；北大周治平教授认为，所谓硅基光子学，就是研究和开发以光子和电子为信息载体的硅基大规模集成技术。其核心内容就是研究如何将光子器件“小型化”、“硅片化”并与纳米电子器件相集成，即利用硅或与硅兼容的其他材料，应用硅工艺，在同一硅衬底上同时制作若干微纳量级、以光子和/或电子为载体的信息功能器件，形成一个完整的具有综合功能的新型大规模集成芯片^[20]。尽管不同学者对硅光的定义存在差异，但都突出强调了利用微电子工艺实现大规模光器件制备这一核心理念，也即光器件的“硅化”。需要注意的是，大多数硅光研究并不追求光器件与微电子器件在单片上的完全集成。目前的主流方法是通过兼容微电子工艺制造硅光芯片，并与微电子芯片采用混合集成方式进行联合设计和封装。在国际上，仅有极少数工厂能够实现光子器件和电子器件在同一硅衬底上的大规模单片集成。

光电融合芯片中所使用的光器件并不限于硅光器件，也可以是基于 III-V 族材料的光器件。由于硅为间接带隙半导体，难以实现高效发光，目前绝大多数采用 III-V 族材料的激光器以补充硅的发光局限性。通过异质外延的方法能够在硅基衬底上生长激光器，但其大规模商业化应用尚未全面实现。同样，光电融合芯片所用的电子器件也不局限于硅基器件，还可以包括基于 III-V 族材料的电子器件，尽管当下硅基电子器件仍是主流。光电融合芯片并不严格要求所有功能都在同一衬底上实现，可通过混合集成或单片集成的方式完成。然而，目前对于单片集成与混合集成孰优孰劣，尚无定论。

硅光是光电融合的一个重要组成部分，但光电融合并不局限于硅基器件。实际上，大多数光电融合芯片在某种程度上采用了基于 III-V 族材料的光器件。由于硅衬底更易于大规模制造，硅基光电融合已成为国际上的重要发展趋势之一。

5.3 光电融合集成与光电融合芯片

以微电子集成和集成电路(微电子芯片)的关系为参考框架，可以帮助我们更好地理解光电融合集成与光电融合芯片之间的联系与区别。

微电子集成的核心在于微电子器件的制备与规模化集成，其重点是物理加工。而集成电路不仅涵盖物理加工的内容，还包含芯片设计等内容，因此，相比微电子集成，集成电路的范围更广。微电子集

成可以看作集成电路的一部分，同时也是集成电路设计的基础。微电子集成与集成电路设计分别为两个独立的领域。如果不拘泥于微电子集成一词的字面意义，并将其内涵扩展至包括集成电路设计等方面，那么微电子集成在广义上可以与集成电路视为同义。然而，即使这两个概念在广义上近似等效，在实际使用中，集成电路显然更为常用且更受欢迎。这种术语偏好不仅反映了集成电路的普遍接受度，也有效避免了使用微电子集成可能带来的语义模糊和理解歧义。

光电融合集成和光电融合芯片都是以光电融合为核心，但侧重点有所区别。光电融合集成更侧重于光电融合与集成的相关内容，强调的是光器件与电子器件的集成技术和工艺；而光电融合芯片则是一个更广义的概念，其涵盖了光电融合集成，还包括芯片设计、封装、测试以及应用等更全面的内容。从字面意义来看，光电融合集成所涉及的对象并不限于芯片，还可以包括诸如衍射光栅等其他集成化器件，其覆盖范围比芯片更广；而光电融合芯片仅涉及与芯片相关的内容。如果不拘泥于光电融合集成一词的字面意义，并将其内涵扩展至包括光电融合芯片设计等方面，那么在半导体芯片范畴内，光电融合集成在广义上可以与光电融合芯片视为同义。然而，即使这两个概念在广义上近似等效，在实际使用中，光电融合芯片更为常用。这种术语偏好不仅反映了光电融合芯片的普遍接受度，也有效避免了使用光电融合集成可能带来的语义模糊和理解歧义。

6 信息处理相关概念与术语

光电融合芯片设计的核心目标在于实现高效的信息处理。开展信息处理研究时，我们首先需要明确信息的基本概念。不同类型的信息之间存在显著差异，信息处理也具有不同的粒度和层次。电信息处理是光电融合信息处理的基础，但二者在机制方面存在重要区别。信息处理的粒度在很大程度上决定了系统的设计空间。

根据香农信息理论，“Information is the resolution of uncertainty”(信息是不确定性的消除)。从这一基本原理出发，香农信息处理可定义为在信息产生、处理、存储、探测和呈现等动态过程中，消除信号不确定性的科学技术体系。信息处理涵盖计算、通信和传输等多种形式，但无论何种形式，都离不开其本质——不确定性的消除。不同形式的光信息处理，均需要消除或减小光信号的不确定性。不确定性消

除是一个动态过程,单个器件无法独立完成,因此单一器件本身无法进行香农信息处理,只有通过多个器件的互连才能实现。多个集成电子器件的互连构成了集成电路;而多个集成电子器件与集成光子器件的互连则形成了光电融合芯片。单个器件本身无法独立承载香农信息,器件互连才能够产生信息,这种互连构成了物理世界与信息世界之间的接口,也是最底层的智能信息技术。

香农信息处理的核心在于消除不确定性,即建立确定性。二者如同硬币的一体两面,相互依存。不确定性主要来源于随机因素,可分为静态随机因素和动态随机因素。静态随机因素主要源于物理制备过程中的随机性,导致器件在出厂时即存在性能差异,但这种差异在制备完成后有可能保持稳定。动态随机因素则导致器件性能随时间变化,例如温度波动和老化的影响,因而无法通过一次性校准实现完全补偿。对于静态随机因素,可通过出厂校准的方式消除其不确定性,从而建立确定性,使参数性能符合预期,且无需实时闭环反馈。相反,动态随机因素通常难以避免,且无法仅凭出厂校准解决,必须借助闭环反馈机制来消除信号不确定性,以建立和维持确定性。

电学信息处理通常基于全局、绝对参考信号进行。该方法通过预设标准信号作为参考,并采用闭环反馈机制,使被控信号与参考信号保持一致,从而消除被控信号的不确定性,即建立确定性。图3所示为一个简化的电信号闭环反馈示意图:以参考信号作为基准,通过比较器将被控信号与参考信号进行比较,产生误差信号;控制器随后根据误差信号调整被控信号,直至误差趋近于零,实现对信号的精确控制。系统中所有信号均基于全局的电平基准,并在此基准上进行处理。例如,当系统的最低电压为0V、最高电压为5V时,所有信号电压均在此范围内波动。整个信息处理过程以全局、绝对参考信号为基础。此类反馈机制在低压差线性稳压器、运算放大器和开关转换器等电路中得到广泛应用。

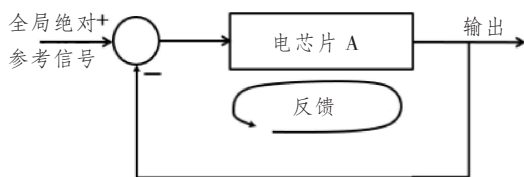


图3 电学闭环反馈示意图

Figure 3 Illustration of closed-loop feedback mechanisms in electronics systems

电信息处理的核心问题在于消除电信号的不确定性;类似地,光信息处理的核心问题在于消除光信号的不确定性。电信号的不确定性消除可在全电域内实现,而光信号的不确定性消除(即建立光信号的确定性)则难以在全光域内完成。光信号不确定性的消除通常无法脱离电子系统独立实现。全光闭环控制需要实用化的全光状态信息获取、全光比较、全光控制及全光参考等模块,但这些模块自身受动态随机因素(如温度波动和器件老化等)影响,难以保持稳定。在可预见的未来,全光闭环控制几乎无法实现。相比之下,光电融合闭环控制是消除光信号不确定性的一种实用化方法。集成化的光信息处理本质上均是光电融合信息处理。

如图4所示,在光电融合闭环控制系统中,反馈环路首先通过获取光芯片的状态信息,并基于特定算法确定调节操作,使光芯片维持在所需的稳定工作点,从而消除光信号的不确定性。需要强调的是,光信息处理通常具有局域性和相对性,与同一芯片上其他器件的状态无关,与某个光信号的相位无关。以马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)和微环调制器(Micro-Ring Modulator, MRM)为例,可以进一步说明上述特性。MZI的输出信号并不依赖于上下两臂的绝对相位,而是由两臂之间的相对相位差所决定,因此无需对绝对相位进行控制,即被控信号本质上是一个相对量。同一芯片上的多个MZI之间相互独立,无需全局信号提供统一参考。MRM的输出信号取决于激光波长和谐振器波长的差值,而非激光波长和谐振波长的绝对值,因此无需进行绝对波长控制。同一芯片上的多个MRM之间相互独立,无需全局信号提供统一参考。每个光器件的控制仅依赖其自身的局部信号,而不受全局信号影响,整个信息处理过程均基于局部和相对的信号进行。事实上,获取绝对光信号值极为困难。采用基于局部和相对信号的控制策略,无需引入绝对光信号参考,可显著降低系统设计的复杂度,是实现光参数稳定性控制的实用化途径。

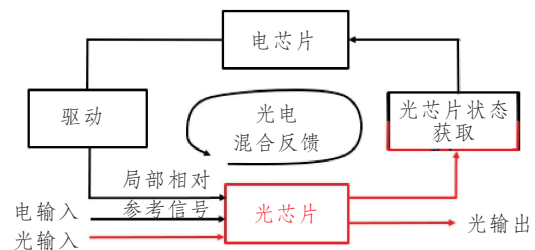


图4 光电融合闭环反馈示意图

Figure 4 Illustration of closed-loop electronic-photon converged feedback mechanisms

信息处理的粒度与物理制备过程相似,存在不同的层级划分。信息处理的粒度越细,所对应的设计空间越大;反之,粒度越粗,设计空间越小,且粗粒度所对应的设计空间构成细粒度设计空间的子集。因此,最细粒度的信息处理能够实现最大范围的设计空间。在香农信息理论的框架下,信息处理被定义为信号不确定性的消除,即信号稳定性的建立过程。具体来说,电信息处理的最细粒度对应于最小电子器件稳定性的建立;而光信息处理的最细粒度则体现为最小光器件稳定性的建立。然而,光器件的工作状态易受随机因素干扰,通常需要借助光电融合闭环控制来实现稳定性保障。由于光器件稳定性的建立往往依赖于电学方法,光信息处理在本质上可视为光电融合的信息处理。需明确的是,此处“信息”特指香农信息论中的定义,因此光信息处理更准确的表述应为“香农光电融合信息处理”(简称“香农光电融合”)。

7 光电融合芯片未来展望

国际上,光子集成技术已取得显著进展,但光电

融合技术的研究仍主要集中于工艺、器件及封装等物理制备层面,整体处于类似集成电路发展早期的“单个晶体管”阶段。目前硅光工艺技术已经逐步成熟,实现了大规模商业化,同时性能也在稳步提升。台积电投入数百人团队进行硅光芯片技术攻关,实现了硅光器件与现有微电子工艺平台的深度融合,并在2024年的国际电子元件会议(International Electron Devices Meeting, IEDM)上发布了其最新工艺平台^[21]。该平台表现出优异的性能指标:插入损耗低于0.3 dB,波导损耗低于0.2 dB/cm,调制器带宽超过60 GHz,谐振波长偏差(1σ)小于0.7 nm,为迈向无晶圆厂模式的光电融合芯片设计奠定了坚实基础。基本粒子不能直接构成电子器件,而是需要借助能带理论、设计软件等理论和工具及设计方法,才能实现有效的器件设计与开发。同样,单个器件也无法自行构成完整系统,必须依赖相应的设计工具与方法体系。如图5所示,当前光电融合系统正处于从器件与集成技术向回路技术过渡的关键时期,下一阶段必须发展类似于集成电路的回路设计技术,即光电融合芯片设计。

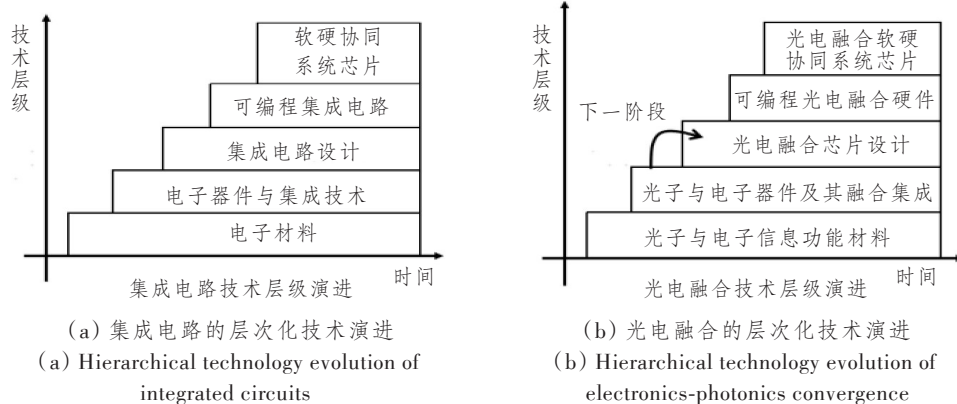


图5 层次化的芯片技术演进

Figure 5 Hierarchical evolution of chip technology

若缺乏实用化的光电融合芯片,单纯提升集成度并无实际意义;而集成度本身也不应成为发展芯片设计技术的障碍,因为光电融合技术的根本目的是解决实际问题。实用化的芯片设计将拉动集成度的提升,而集成度的提高又会反过来促进芯片设计技术的发展。技术演进普遍遵循需求拉动与技术推动的双重逻辑,唯有当技术进步带来的收益超过其所需成本,才能实现可持续发展。在此过程中,实用化的光电融合芯片是提升技术收益、实现可持续发展的关键环节。集成电路是当前唯一实现大规模扩展与实用化的片上信息处理系统。经过半个多世纪的发展,已形成涵盖工艺、器件、电路、系统、设

计工具及应用的完整产业链。相比之下,光电融合芯片结构更为复杂,其大规模实用化必然需要构建类似的产业链与生态系统。光电融合芯片可以复用部分集成电路基础设施,并借鉴其产业发展经验。在实现大规模实用化之前,光电融合芯片仍面临诸多新挑战,积极借鉴集成电路的发展经验将显著加速光电融合芯片设计技术的成熟

7.1 光电融合芯片设计将发展成类似集成电路设计的独立研究领域

在集成电路设计发展成熟之前,不存在与之类似的大规模回路设计技术及设计自动化工具。集成电路设计是一个需求驱动的长期迭代创新发展过

程,在此之前没有其他类似的回路设计经验可以借鉴,初期研究人员的研究基础大多是器件和物理学科。随着设计复杂度的不断提升及行业的快速发展,集成电路设计才逐步建立其研究基础,并发展成为一个独立的专门研究领域。参照集成电路发展经验,光电融合芯片设计也将类似地发展成为一个独立的专门研究领域。集成电路设计在发展过程中形成了模拟功率和高速射频等不同的专业分工,光电融合芯片设计也将发展出模拟功率和高速射频等不同的子方向。传统模拟功率和高速射频等类型的集成电路是模拟功率和高速射频等不同类型光电融合芯片设计的基础。我们可以从模拟功率和高速射频等不同集成电路细分领域出发,开展模拟功率和高速射频等光电融合芯片方向设计研究。就集成电路而言,高速射频设计通常依赖于模拟电路及电源管理的性能,而模拟及电源管理对高速射频则基本没有依赖,是相对更加独立的研究领域。单个微电子器件通常不需要进行单独的稳定性控制,而在光电融合领域,高速射频光电融合芯片的光子器件(例如MRM和MZI等)通常存在光器件稳定性问题,对模拟有一定的依赖性。此外硅基光子器件大多使用片上热调器进行调控,需要与之配套的光器件功率管理电路。光器件稳定性及其功率管理是光电融合芯片研究领域的新问题。就光电融合而言,模拟功率研究相对高速射频研究是一个更加独立的研究领域,至少具备与高速射频同等的重要性。目前大部分光电融合芯片设计研究人员均是基于高速射频研究开展相关研究工作的,而更加独立且至少同等重要的模拟功率光电融合领域仅有零星工作被发表,是尚未开发的重要研究方向。

复杂系统最终将发展成为层次化的系统,新的复杂系统将经历从没有层级结构到形成新的层级结构的发展历程。层级结构的形成过程是一个融合的发展过程。各层之间经过融合形成新的界面,使得同一层级内部充分融合,并实现同一层级的独立设计,各层级间通过接口方式进行信息交流,形成新的分层交互模式。参照以上规律,光子和电子综合系统也必然经历从分离到融合到形成独立分层的发展历程,并最终拓展到更大参数空间的多元异质融合芯片领域。在分离到融合的发展初期,光器件和光电融合芯片设计会呈现紧密耦合的关系,此时尚未形成成熟的光子器件模型,器件制备平台也不一定完全稳定,光器件和光电融合芯片设计并未达到像集成电路一样的独立程度。随着器件制备平台和光

子器件模型逐步走向稳定和成熟,光电融合芯片设计与器件制备的耦合程度逐步变低;当光子器件模型变得足够成熟和精准后,器件和回路两者逐步解耦合,器件制备和光电融合芯片设计最终发展成类似集成电路的独立层次。以下是光电融合芯片设计发展的5个阶段:

第1阶段:集成光子与光电融合芯片设计紧密耦合,同时集成光子器件逐步标准化。

第2阶段:光子器件走向成熟,并开发出成熟的集成光子器件紧凑模型,实现与微电子器件的联合仿真。通过光子器件紧凑模型与光电融合芯片设计的反复迭代,光子器件紧凑模型逐步走向成熟,初步实现光电融合芯片设计与集成光子器件的解耦。

第3阶段:形成类似集成电路设计的光电融合芯片设计独立领域,模拟光电融合芯片实现大规模实用化。

第4阶段:模拟光电融合芯片的发展为射频光电融合芯片等其他光电融合芯片设计细分领域奠定基础,同时其他类型光电融合芯片设计的发展进一步促进模拟光电融合芯片走向成熟,全面推动光电融合芯片走向成熟。

第5阶段:借鉴光电融合芯片的发展经验,开拓机光电、量光电、声光电和磁光电等多元异质融合芯片设计新领域,发展多元异质融合集成微系统。

7.2 借鉴集成电路设计经验可以加快光电融合芯片设计的发展进程

虽然集成光子和集成电路设计均是光电融合芯片设计的基础,但是国际上相关研究组均是基于集成电路基础开展光电融合芯片设计研究工作的。原因在于,集成光子和光电融合芯片设计在内容、方法和理论基础等诸多方面均有很大差别,两者之间不存在继承发展关系,而集成电路设计的研究基础和发展经验则能够很好地被光电融合芯片设计所继承发展。集成光子主要关注光子器件相关内容,基于半导体物理基础,采用物理设计工具完成器件设计,并通过半导体制备工艺进行加工,最终得到满足一定性能指标的物理实体。虽然集成光子是光电融合芯片设计的物质基础,但是其无法直接指导光电融合芯片设计研究。如果从集成光子基础发展光电融合芯片设计,则需要重新造轮子打造集成电路设计方法及基础设施。光电融合芯片设计和集成电路设计两者在研究目标、理论基础、设计方法及设计工具方面存在很多相似性,光电融合芯片设计不仅可以继承集成电路设计方法,也可以借鉴集成电路的紧

凑建模方法及设计自动化工具。集成电路设计和光电融合芯片设计均研究通过器件互连来实现特定功能,也都采用辅助设计软件来完成规模化设计。两者的主要区别在于,集成电路仅仅涉及电子器件的互连,而光电融合芯片则涉及光子和电子两种不同器件的互连。集成电路设计通常只需要知道器件的紧凑仿真模型,再通过行为级模型完成器件之间的互连,而不用过度关心器件内部机理和实现过程。类似集成电路设计,未来光电融合芯片设计只需要知道光子器件和电子器件的紧凑仿真模型,而无需过多关心其内部机理和实现过程。光子器件紧凑模型、工艺厂工艺设计套件(Process Design Kit, PDK)以及光电协同仿真等在发展初期并不完善,需要设计人员具备一定的集成光子基础甚至一定的集成光子设计能力。当光电融合芯片设计逐步形成明确成熟的分工时,其整个设计流程会变得与集成电路设计非常相似,设计门槛也会大幅降低,不再需要设计人员具备太多底层光器件知识。但是在尚未有成熟的光子器件紧凑仿真模型之前,掌握相关集成光子知识仍然是必要的。

图6按照技术发展的逻辑展示了集成电路技术演进的路线图。集成电路经历了从材料到大规模系统的长期演进,并发展出相关的关键技术要素。材料和工艺是电子器件制造的基础。基础电子器件包括电容、电阻和晶体管等。其中,金属-氧化物-半导体(Metal-Oxide-Semiconductor, MOS)晶体管是目前的主流器件,并在很长一段时间内遵循摩尔定律的预测不断缩小。目前, MOS晶体管已实现3 nm的量产,但受量子效应等因素的影响,进一步缩小难度加大,摩尔定律即将走到尽头。对于大规模芯片设计而言,高效的建模和仿真技术对加快设

计迭代、最终实现大规模系统至关重要。单个静态器件本身不具备信息处理能力,器件互连形成动态调节才能实现信息处理。受温度和老化等随机因素的影响,器件性能存在动态不确定性,需要通过闭环控制来维持稳定性。模拟集成电路以稳定性为核心,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、噪声和温度等随机因素的影响。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。大规模集成电路的协同工作也依赖同步时钟,也就是稳定的振荡信号。射频集成电路的核心则是振荡信号的产生。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。另外,我们通常需要稳定的振荡器,采用闭环反馈环路实现稳定的振荡是通常使用的技术手段。在稳定与振荡的基础上,我们可以进一步实现数字集成电路。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。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、组合逻辑以及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。模拟、射频和数字等基础电路模块结合封装技术,使得图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)、中央处理器(Central Processing Unit, CPU)等复杂且大规模的系统得以实现。

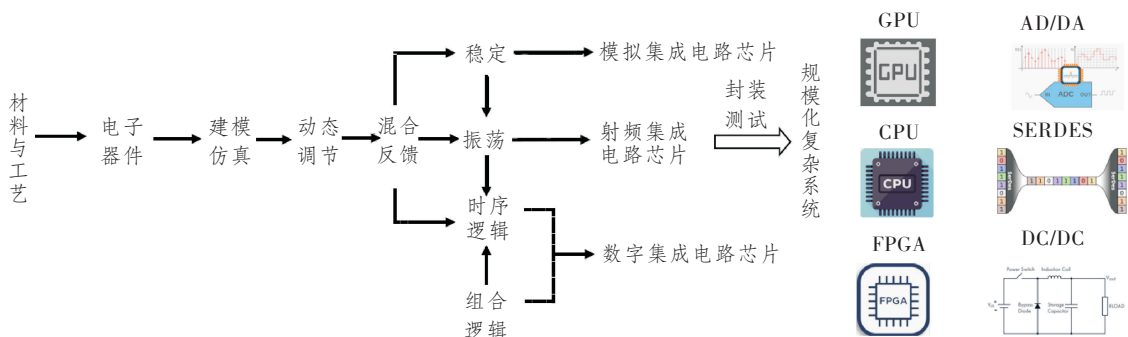


图6 集成电路技术演进路线图

Figure 6 Technology evolution roadmap of integrated circuits

稳定、振荡、存储、器件尺寸持续缩减(也就是摩尔定律)、紧凑模型与设计工具等是集成电路的关键

技术要素,在集成电路技术演进中扮演着重要的角色。稳定是一切的基础, TI 和 ADI 等技术公司在

早期均是从事稳定性相关业务的。使 Kilby Jack 获得诺贝尔奖的工作是一个振荡器。存储是冯诺依曼计算机体系结构的核心组成部分。摩尔定律则引领了过去半个多世纪微电子产业的发展主旋律。加州大学伯克利分校在微电子紧凑模型和仿真工具方面做出了开创性的工作。这些关键技术要素分别催生了相应的专业化机构开展相关业务,逐步形成了完善的产业链分工,同时衍生出了如垂直整合制造(Integrated Device Manufacturer, IDM)和无晶圆厂(Fabless)等不同的商业模式。早期的公司主要以 IDM 为主,英特尔(Intel)公司是 IDM 模式的代表性企业。1980 年,美国国防部投资南加州大学,成立了 MOSIS 机构。MOSIS 利用多项目晶圆(Multi-Project Wafer, MPW)技术,在 1 套掩模版上集成了几十甚至上百种不同的芯片设计,并在同一块晶圆上实现流片。这大幅降低了芯片设计和流片的成本,并推动了一种全新的 Fabless 商业模式。采用这一模式的代表性企业包括英伟达(NVIDIA)、高通(Qualcomm)、博通(Broadcom)以及赛灵思(Xilinx)等。

光子器件本身无法构建实用化的系统,需要结

合电子器件才能实现实用化。更具体而言,光子器件无法单独实现实用化的反馈功能,只有将光子器件与电子器件结合形成混合系统,才能具有实用化的反馈能力。对应于集成电路的物理制备技术,是光子芯片的物理制备技术;然而,与集成电路芯片设计相对应的并不是光子芯片设计,而是光电融合芯片的设计。光子芯片无法形成类似于集成电路的技术演进路线图,只有光电融合才能形成类似集成电路的技术演进路线图。图 7 所示为光电融合技术的演进路线图。基础光子和电子材料支持光子与电子器件的制备和集成。典型的光子器件包括激光器、探测器、调制器和波导等。光电融合芯片设计的仿真平台大都基于已有微电子设计平台,实现了对集成电路设计基础设施的复用。在微电子器件建模仿真的基础上,对在电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)兼容平台进行光子器件建模,可以实现光电联合仿真。目前国际上在光子器件紧凑模型方面工作还较少,同时也尚未形成类似微电子 BSIM (Berkeley Short-channel IGFET Model)的标准模型。

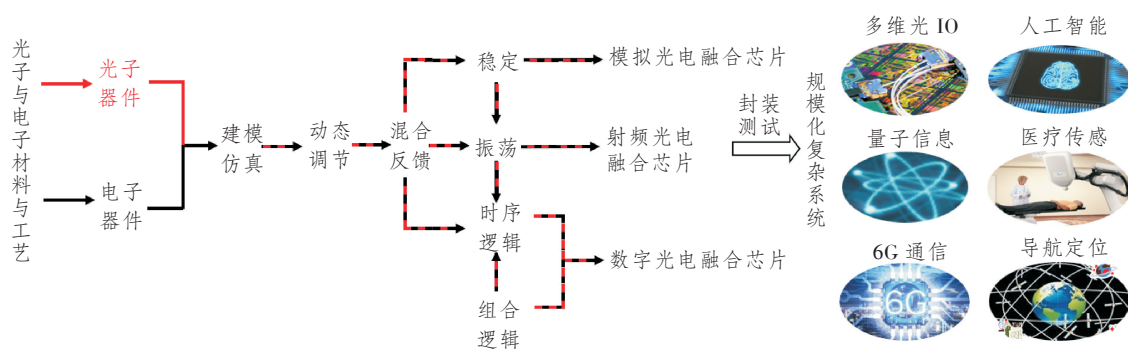


图 7 光电融合技术演进路线图

Figure 7 Technology evolution roadmap of electronics-photonics convergence

与电子器件相比,光子器件更容易受到温度和老化等随机因素的影响,器件性能存在动态不确定性,因此需要通过闭环控制来维持稳定性。模拟光电融合芯片以稳定性为核心,主要用于处理光学模拟信号,并通过闭环控制来消除或减弱工艺偏差、噪声和温度等随机因素的影响。稳定性是闭环反馈控制系统的核心关键所在。由于实现光学参数的稳定有时也需要处理高速电学信号,此时高速射频集成电路也就成为模拟光电融合芯片不可或缺的一部分。通过光电融合方式有望实现较纯电方式更好的振荡信号。射频光电融合芯片的核心是高性能振荡信号的产生。光电融合振荡信号的产生需要光电混

合闭环反馈环路,同时需要满足一定的振荡条件。采用光电混合闭环反馈环路实现稳定的振荡是通常使用的技术手段。在稳定与振荡的基础上,有可能进一步实现数字光电融合芯片,但是存在两个主要的技术挑战。首先,光信号在波导内的传播存在衰减,且难以恢复到原来的功率;其次,由于不存在静止的光子,无法对光子进行存储,因此难以实现类似电学寄存器的实用化光学寄存器。没有实用化的光学寄存器,就难以实现实用化的光子时序逻辑。基于以上两个原因,目前还难以实现类似大规模数字集成电路的大规模数字光电融合芯片。新型光子器件的发明或巧妙的系统设计,有望克服上述两个挑

战,从而实现大规模的数字光电融合芯片。把电学寄存器与光逻辑相结合理论上也有实现光电融合时序逻辑的可能性,但是由于引入了光电转换,会造成额外的功耗代价。通过结合模拟、射频和数字3种类型的基础光电融合模块与封装技术,最终有望实现大规模光电融合集成系统。

除去集成电路的5个关键技术要素外,光电融合芯片包括光电融合稳定、光电融合振荡、光电融合新功能、整体尺寸缩减及系统规模扩大、光子器件紧凑建模与EPDA工具等关键技术要素。光学信号难以在自身范畴实现稳定,通过光电混合反馈是实现光信号稳定性的实用化方法。光电融合振荡是指通过光电融合的方式,而非纯电的方式,实现信号的振荡,包括光学信号振荡及电学信号振荡两种情况。光器件的加入使光电融合芯片能够实现纯电子系统无法实现的新功能。光子器件的尺寸受限于其波长,难以像晶体管那样持续缩小,然而,光子器件与电子器件的集成可显著减小整体系统体积。此外,光互连技术可实现近乎距离无关的信号传输,突破了系统尺寸的限制,从而允许使用更多器件,构建更大规模的系统。紧凑建模及EPDA工具是大规模光电融合系统芯片设计的基础,目前仍处于开发阶段,尚未实现大规模商业化。与集成电路类似,光电融合也将逐步形成完善的产业链分工,并衍生出IDM和Fabless等商业模式。尤其是Fabless模式将极大地推动光电融合芯片设计的发展。台积电等工艺厂正在加速推动光电融合技术的开发,为光电融合Fabless模式奠定工艺平台基础。

8 结束语

电子系统经历了从分立到集成的漫长演进过程,光电融合芯片也将类似地经历从分离到融合的一个长期演化过程。光电融合芯片的本质是从物理制备到信息处理的全方位和细颗粒度一体化。光电融合芯片的成功关键在于构建一个自我造血的生态系统。其发展是一个涉及科研、产业和人才协同推进的长期过程。借鉴集成电路的成功经验可显著加速光电融合芯片的发展进程。光电融合芯片所奠定的技术范式与基础设施,将有望引领我们迈向一个集成了光、电、机、量、声和磁等多元异质信息的物理智能新时代。

参考文献:

[1] Saleh B E A, Teich M C. Fundamentals of Photonics [M].

New York, USA: Wiley, 1991.

[2] Lifante G. Integrated Photonics: Fundamentals [M]. New York, USA: Wiley, 2003.

[3] Miller S E. Integrated Optics: an Introduction [J]. Bell System Technical Journal, 1969, 48(7): 2059–2069.

[4] Photonics. What is Integrated Photonics [EB/OL]. (2022-04-03) [2025-10-01]. <https://www.aimphotonics.com/what-is-integrated-photonics>.

[5] Goodman J W. International Trends in Optics [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1991.

[6] Lee C P, Margalit S, Ury I, et al. Integration of an Injection Laser with a Gunn Oscillator on a Semi-Insulating GaAs Substrate [J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(12): 806–807.

[7] Soref R A. Silicon-based Optoelectronics [J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(12): 1687–1706.

[8] Gnauck A H, Koren U, Koch T L, et al. Four-Channel WDM Transmission Experiment Using a Photonic-Integrated - Circuit Transmitter [C]//Optical Fiber Communication. San Francisco, CA, USA: OSA, 1990: PD26.

[9] 周治平. 我们为何会“芯”痛? 一文详解芯片基本概念 [EB/OL]. (2021-01-07) [2025-10-01]. <http://www.juzizhoutou.net/tianxia/jiaodian/2021-01-07/8778.html>.

Zhou Z P. Why We Have a 'Chip' Heartache: A Comprehensive Guide to Semiconductor Basics [EB/OL]. (2021-01-07) [2025-10-01]. <http://www.juzizhoutou.net/tianxia/jiaodian/2021-01-07/8778.html>.

[10] Heidel N D, Usechak N G, Dohrman C L, et al. A Review of Electronic-Photonic Heterogeneous Integration at DARPA [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 8300209.

[11] 谭旻, 明达, 汪志城. 从光子集成迈向光电融合集成回路: 以微环波长锁定为例 [J]. 微纳电子与智能制造, 2019, 1(3): 32–47.

Tan M, Ming D, Wang Z C. From Photonic Integration to Electronic-Photonic Heterogeneously-Converging Integrated Circuits: a Case Study of Wavelength Locking of Microrings [J]. Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing, 2019, 1(3): 32–47.

[12] 谭旻. 光电融合芯片: 概念、挑战及进展 [R/OL]. (2022-08-06) [2025-10-01]. <https://ephic.net/2022SongshanLakePub.pdf>.

Tan M. Electronic-Photonic Heterogeneously-Converging Integrated Circuits: Concepts, Challenges, and Progress [R/OL]. (2022-08-06) [2025-10-01]. <https://ephic.net/2022SongshanLakePub.pdf>.

- [13] Tan M, Wang Y, Wang K X, et al. Circuit - Level Convergence of Electronics and Photonics: Basic Concepts and Recent Advances[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2022, 15(1): 16.
- [14] Ming D, Wang Y, Wang Z, et al. EPHIC Models: General SPICE Photonic Models for Closed-Loop Electronic-Photonic Co-Simulation[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2024, 71(4): 1819–1831.
- [15] Soref R A, Lorenzo J P. Single-Crystal Silicon: a New Material for 1.3 and 1.6 μm Integrated-Optical Components[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(21): 953–954.
- [16] Soref R, Lorenzo J. All - Silicon Active and Passive Guided-Wave Components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(6): 873–879.
- [17] Bogaerts W, Chrostowski L. Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(4): 1700237.
- [18] Rahim A, Spuesens T, Baets R, et al. Open - Access Silicon Photonics: Current Status and Emerging Initiatives[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(12): 2313–2330.
- [19] Pavesi L. Thirty Years in Silicon Photonics: a Personal View[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 786028.
- [20] 周治平. 硅基光电子学[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- Zhou Z P. Silicon Photonics[M]. Beijing, China: Science Press, 2021.
- [21] Hsia H, Wu J Y, Liang S W, et al. EPIC - BOE: an Electronic - Photonic Chiplet Integration Technology with IC Processes for Broadband Optical Engine Applications[C]//2024 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2025: 10873589.