



北京邮电大学

Beijing University of Posts and Telecommunications

# 集成光学理论与技术

## 文献阅读报告

姓 名	呼子博
学 号	2024111302
学 院	集成电路学院
专 业	集成电路科学与工程
任课教师	张天悦

# 集成光学技术的研究进展与展望

## 摘要

后摩尔时代，以电子为信息载体的微电子芯片，使用金属作为传输介质，由于损耗高、能耗大、效率低，信息处理速度与容量受限，已逐渐达到带宽、集成度和计算速度的极限。光子集成芯片作为新型芯片，依赖光子硬件而非电子硬件，以光运算代替电运算，具有高速度、大带宽、低功耗、无串扰传输以及可并行计算的优势，是后摩尔时代“超越摩尔”(Beyond Moore)的重要技术路线之一。光子集成芯片在参量调控、信息存储和逻辑计算等方面具有全新的技术特征，是未来满足人工智能、万物互联、云计算等领域对超大容量信息获取、传输、计算、存储和显示的重要潜在支撑技术。

集成光学(Integrated Optics)[11]是一种将光学元件集成在同一基片上的技术，类似于集成电路在电子学中的应用。它通过微加工技术将光学元件(如波导、分束器、调制器、探测器等)集成在一起，从而实现高效的光信号处理和传输。集成光学电路(Photonic Integrated Circuits, PICs)作为一种颠覆性技术，正在推动光通信、数据中心、传感和量子技术等领域的快速发展。近年来，随着数据流量的指数级增长和对高灵敏度传感需求的提升，集成光学电路逐渐成为解决这些问题的核心技术。本文系统综述了集成光学电路的关键技术进展，包括材料、制造工艺、核心器件和应用场景，重点关注其在电信、光通信和传感领域的应用现状。同时，分析了集成光学技术面临的挑战及未来趋势，如异质集成、量子光子学和光学计算等新兴方向。

## 一、引言

随着数据流量的持续增长和对高性能传感器需求的激增，光通信和传感技术面临着巨大的挑战。传统光通信系统依赖于分立光学器件，这种方式不仅体积大、功耗高，而且制造和维护成本昂贵。集成光学电路通过在单一芯片上集成多个光学功能模块(如激光器、调制器、探测器和波导)，实现了光学系统的小型化、高速化和低功耗化，成为光通信和传感领域的核心技术。

近年来,集成光学技术得到了快速发展,其应用范围从数据中心和电信网络扩展到传感、量子计算和人工智能等领域。硅光子学、磷化铟光子学和氮化硅光子学等技术路线的不断成熟,使得光子集成电路的性能和集成度得到了显著提升。

## 二、集成光学电路技术基础

### 2.1 材料体系

集成光学电路的性能高度依赖于所使用的材料体系。不同材料具有各自的优势和局限性,在特定应用中发挥着关键作用。随着制造技术的进步和新材料的不断研发,集成光学材料体系将朝着更高性能、更低成本和更广泛应用的方向发展。

#### 2.1.1 硅光子学 (Silicon Photonics)

硅光子学 (Silicon Photonics) [10] 是目前最成熟的光子集成技术,得益于其与传统半导体制造工艺 (CMOS) 的高度兼容性,硅光子学能够实现低成本、大规模制造。硅材料在近红外波段 (1.2-1.6  $\mu\text{m}$ ) 具有良好的透明性,使其成为光通信的理想选择。然而,硅的直接带隙特性限制了其作为光源的能力,因此通常需要与磷化铟或其他发光材料进行异质集成。应用场景: 数据中心高速互连、短距离光通信、光学计算。限制: 硅的非线性效应较弱,且缺乏高效的光源和放大器。

#### 2.1.2 磷化铟 (Indium Phosphide, InP)

磷化铟因其直接带隙特性,能够实现高效的光源 (如激光器) 和探测器,是目前高性能光通信系统的主要选择。磷化铟还支持宽带宽的调制和放大功能,适用于长距离通信和高数据速率应用。应用场景: 长距离光通信、相干光通信、高速调制器。限制: 制造成本较高,且与硅基工艺的兼容性较差。

#### 2.1.3 氮化硅 (Silicon Nitride, SiN)

氮化硅因其超低损耗特性和宽带透明性,成为光子集成电路中不可或缺的材料。与硅相比,氮化硅在可见光至中红外波段范围内具有更广的透明性,特别适合高精度光学传感和滤波器设计。应用场景: 光学传感、生物医学检测、频率梳。限制: 氮化硅的制造工艺复杂,

特别是在与硅集成时需要优化应力控制。

#### 2.1.4 铌酸锂 (Lithium Niobate, LiNbO<sub>3</sub>)

铌酸锂是一种传统的电光材料,近年来,铌酸锂薄膜技术的突破使其重新成为研究热点。铌酸锂调制器具有高带宽和低损耗的特点,是高速通信的理想选择。应用场景:高速光通信、光信号处理、量子光学。限制:制造成本高,且与其他材料的集成复杂。

总的来说,随着制造技术的进步和新材料的不断研发,集成光学材料体系将朝着更高性能、更低成本和更广泛应用的方向发展。

## 2.2 核心器件

近年来,信息和通信技术的飞速发展,使得对高性能光学器件的需求激增[1]。其中作为数据通信、传感和成像等各种应用支柱的光芯片引起了极大的关注。成为解决当前数据中心和高性能计算系统中存在的通信瓶颈问题的极具竞争力的技术。利用光子集成电路(PCI)将半导体激光器、光调制器、光探测器、波导、多路复用器等集成在单个芯片上。通过互补金属氧化物半导体(CMOS)制造和封装技术,PIC 具有超低成本、低功耗、大规模制造、大集成密度和高扩展性能技术。

光子集成电路的性能由其核心器件决定。以下是几种关键器件的最新进展:

### 2.2.1 激光器

激光器是光通信系统的核心光源。硅已经被证明在传输、调制和检测光方面具有出色的表现,然而,硅是间接带隙半导体材料,这使其发光效率低下[2],因此片上光源一直是硅基 PIC 急需解决的问题。为了获得出色性能的硅上光源,科研人员进行了大量研究工作。磷化铟基激光器是目前的主流选择,而硅基激光器[3]的研究也在快速发展,特别是在异质集成技术的推动下。

- 混合集成激光器:通过将磷化铟激光器与硅波导集成,可以同时实现高性能和低成本。
- 单片集成激光器:近年来,基于量子点技术的磷化铟激光器表现出优异的性能,特别是在高温稳定性和低功耗方面。

### 2.2.2 调制器

电光调制器用于将电信号转换为光信号，是光通信链路中的关键器件。基于绝缘体上硅(SOI)的硅基光电调制器，具有尺寸紧凑、调制效率高、兼容 CMOS 工艺等优势，不仅一直是学术研究的热点，并且已经实现了大规模商用部署。

硅基调制器因其低成本和高集成度在短距离通信中表现突出，而铌酸锂调制器则因其高带宽和低损耗在长距离通信中更具优势。

近年来，薄膜铌酸锂(TFLN)作为新型的光子集成平台，为高性能、高集成度的铌酸锂光波导器件研发提供了新的技术路径。

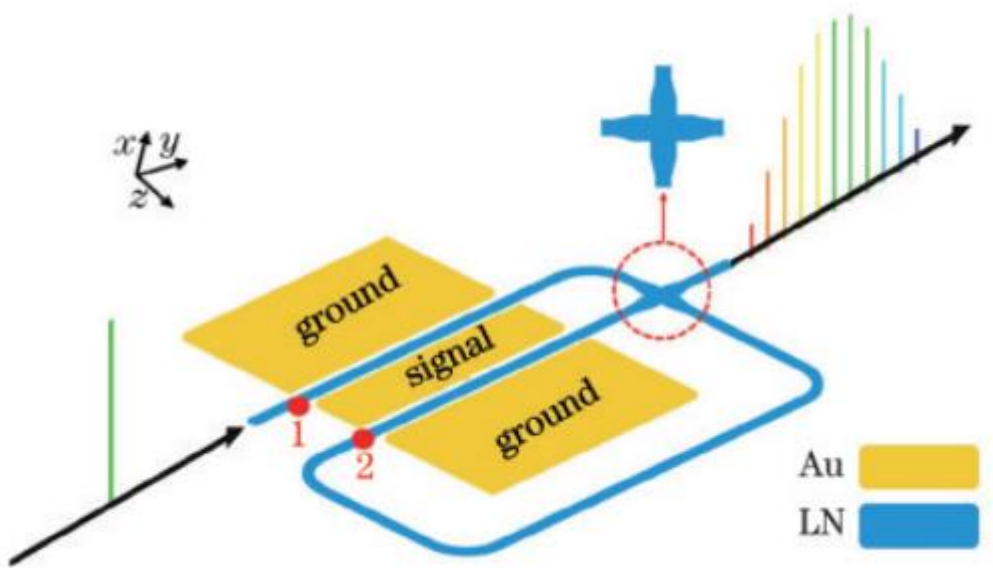


图 1 交叉型相位调制器基本结构

TFLN 交叉型相位调制器的基本结构如图 1 所示。入射光首次耦合进光波导后，进入 GSG 电极调制区域，调制完成后进入交叉波导区域(虚线圆形框图所示)。为确保有效传输，交叉波导被设计为沿 y 方向和 z 方向具有高传输率的结构。随后，光信号经过下端的直波导和圆环结构后，再次进入电极调制区域。此时，电场方向与初次入射时相反，需确保第二次进入调制区域前的光与入射光相比存在有效相位延迟，从而形成两段电光调制区域相位的累积。因此，射频信号频率和延迟线长度(即两个调制区之间的光波导长度)需满足一定的条件，此时  $V_{\pi}$ ，RF 缩小为单段调制结构的一半，从而增强电光调制效率。

### 2.2.3 探测器

光电探测器用于将光信号转换为电信号。迄今为止，采用晶圆键合或转印技术的异质集成是 III-V 族有源器件集成在硅光子平台上最成熟的方法，通过倏逝波耦合策略，高性能的 III-V 族光电探测器已经集成在硅光子学平台上并实现了与无源器件的光耦合[4][5][6]。硅基探测器（如 Ge/Si 探测器）在近红外波段表现出色，而磷化铟探测器则适用于更宽的波长范围。

### 2.2.4 波导

波导是光子集成电路的基本组成部分，用于引导光信号的传输。硅波导因其高折射率对比度，能够实现极小的弯曲半径和高密度集成。掺铒光纤放大器（EDFA）为信号光放大提供了重要的技术支撑，是现代光纤通信网络中不可缺少的关键性功能器件。随着集成光子电子技术的发展，参照 EDFA 的发展路线，片上集成的掺稀土元素波导放大器被认为是解决芯片级增益和激光产生瓶颈的有效途径。目前，国际上以掺铒氮化硅、掺铒铈酸锂、掺铒氧化铝、掺铈氧化铝等平台为代表，已开发出高性能的片上光放大器和可调谐激光器。

## 2.3 光集成芯片

光子集成的概念类可以比于集成电路技术，其核心是将光学系统集成到一颗芯片上的技术体系。光子集成芯片可将光学系统的体积缩小上千倍、重量降低上千倍，被认为是未来信息产业发展的关键使能技术。与集成电路的发展历程类似，光学和光子技术也经历了从分立元件到光学系统再到光子集成芯片的发展阶段。[12]

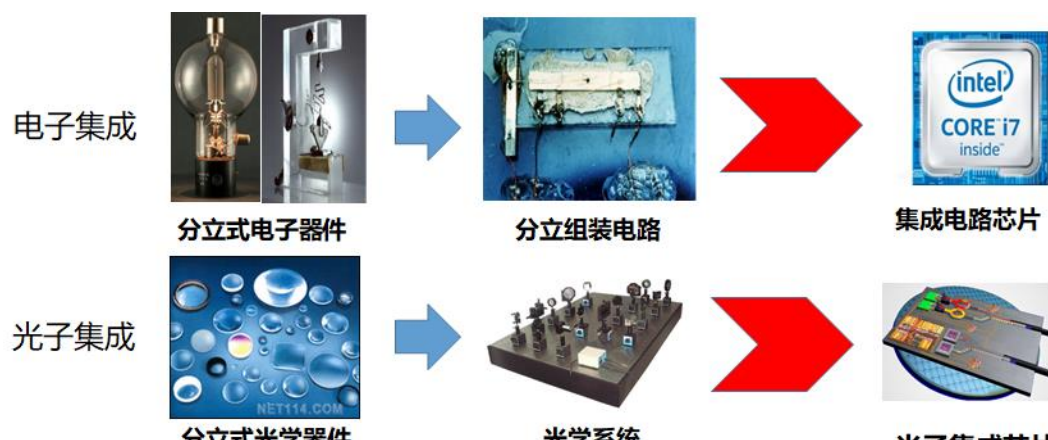


图 2 电子集成与光子集成

随着摩尔定律接近瓶颈，传统的电信号处理已接近其物理极限，研究人员针对光信号处理器展开广泛的探索研究。

其中可编程大规模光信号处理器[8]，能够通过编程实现不同功能的切换，并且可以在后处理中进行修正和优化，成为当前研究热点。

硅基可编程多功能光子芯片[7]是信息光子领域的一种关键芯片，可以实现高速、多功能的片上光逻辑计算、光学信息处理等多种重要应用。这一类芯片利用硅基光电子器件构建光子链路，并可以通过在光电子器件上加载热学、电学信号来实现器件的功能编程和信号加载，进而可以基于单个芯片实现多种功能。

目前，基于单一芯片通过器件编程实现多种计算功能是光子芯片领域的一个重要研究方向。硅基光电子技术的发展提供了针对单一器件、芯片的控制方式，进而使得单一硅基行骗实现可编程多功能光逻辑计算和光学信息处理应用成为可能。

相关可编程多功能集成光学芯片示意如图 3，硅基芯片包含多个可编程单元，这些单元可以基于微环、微盘或马赫-曾德尔器件实现。同时，单元之间的光学链路可以实现选通，

并且单元器件的工作状态可以通过编程实现多种复杂功能。

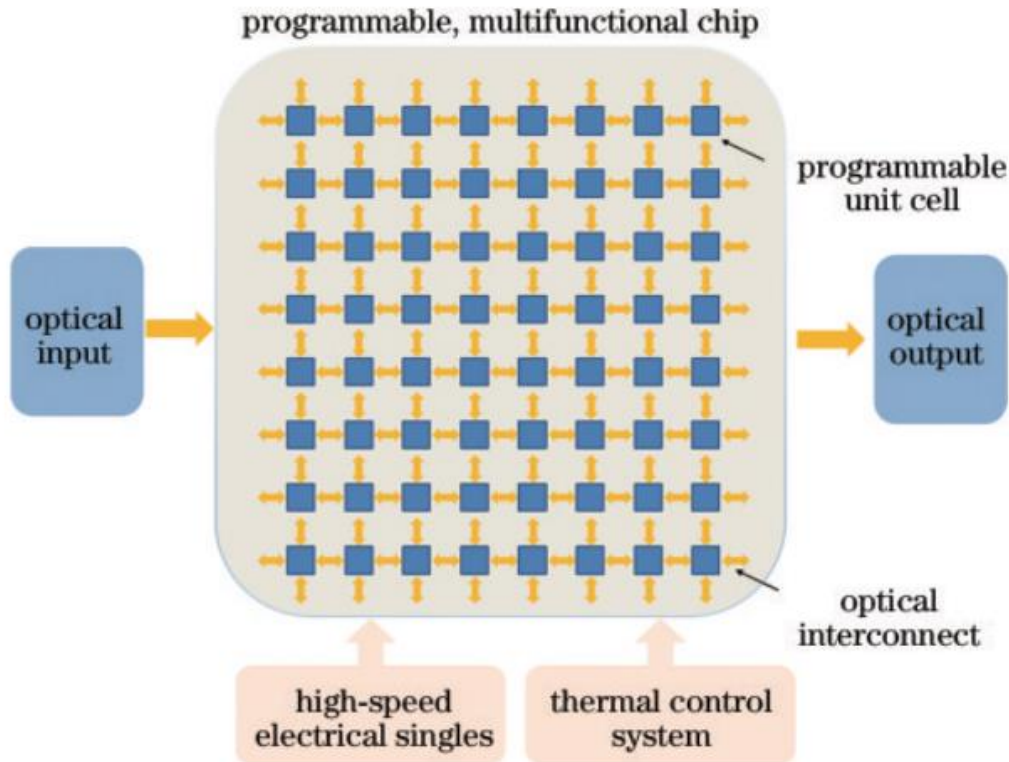


图 3 可编程多功能集成光子芯片示意图

### 2.3.1 面向光逻辑计算光子芯片

近年来，随着硅基光电子器件的兴起，利用这些器件实现片上光逻辑计算的技术发展迅速。在这一领域，中国科学院半导体研究所、兰州大学、莱斯大学和德州大学奥斯汀分校等机构都做出了出色的贡献，成功实现了矢量-矩阵乘法器和全加器等器件。这些芯片利用光子高速传输的特点，实现了可编程、低功耗的光学逻辑运算，包括多种同或（XNOR）、与（AND）等逻辑运算，目前计算速度已从 KHz 提升至 GHz 量级。

### 2.3.2 面向光学信息处理光子芯片

近年来，利用硅基器件实现光学信息处理成为一个重要的应用方向，主要集中在可编程多功能滤波器和延时线等应用。在这一领域，澳大利亚莫纳什大学的研究人员首先基于氮化硅实现了可编程多功能微波光子滤波器。由于该器件的多功能特点，这项研究引起了学术界的广泛关注。近期，澳大利亚莫纳什大学、西班牙瓦伦西亚理工大学、加拿大渥太华大学、



韩国大邱庆北科学技术院、中国科学院半导体研究所、浙江大学、电子科技大学和华中科技大学等研究单位都在功耗、速率和编程等方面取得了重要进展。

根据芯片中单元器件的光路结构，上述芯片主要分为前向型和环路型两种。其中，前向型芯片的光路沿一个方向传输，不会出现环路情况；而环路型芯片则可以实现光学环路，从而实现多种复杂的光学滤波功能，满足实际应用需求。

目前，基于单一芯片通过器件编程实现多种计算功能是光子芯片领域中一个重要的研究方向。同时，硅基光电子技术的发展提供了针对单一器件、芯片的控制方式，进而使得基于单一硅基芯片实现可编程多功能光逻辑计算和光学信息处理应用成为一种可能。

## 三、应用场景

### 3.1 光通信

光通信是集成光学电路的主要应用领域。随着数据流量的快速增长，光通信系统需要更高的带宽、更低的功耗和更小的尺寸。

- 数据中心互连：硅光子学在数据中心短距离互连中表现出色，能够实现 100 Gbps 及以上的数据传输速率。
- 相干光通信：磷化铟基光子集成电路支持高阶调制格式和超高速传输，是长距离通信的理想选择。

### 3.2 光学传感

集成光学电路在传感领域的应用正在快速扩展，特别是在生物医学检测、环境监测和工业自动化中。

- 生物医学传感：基于氮化硅和硅光子的传感器能够实现高灵敏度的生物分子检测，适用于疾病诊断和药物开发。
- 激光雷达（LiDAR）：集成光学技术能够显著降低 LiDAR 的体积和成本，为自动驾驶和无人机技术提供支持。

### 3.3 量子光子学

集成光学电路在量子信息处理中的应用前景广阔。基于氮化硅和磷化铟的量子光子器件正在推动量子通信和量子计算的发展。

## 四、技术挑战

尽管集成光学技术取得了显著进展，但仍面临以下挑战：

- 材料限制：硅材料的发光效率低和非线性效应弱限制了其在某些应用中的性能。
- 热管理问题：光子集成电路中的热效应会影响器件性能，特别是在高功率应用中。
- 制造工艺复杂性：多材料集成和异质集成的复杂性增加了制造成本和工艺难度。

## 五、应用场景

### 5.1 异质集成

将多种材料（如硅、磷化铟、氮化硅等）集成到单一芯片中，结合各自的优势，已经成为未来发展的主流方向[9]。

由于 III-V 族半导体材料具有直接带隙和高光学增益，将 III-V 激光器集成到硅上是非常有吸引力的。在硅基板上实现 III-V 光源异质集成的方法主要可以分为以下 4 种类型：倒装芯片集成、芯片/晶圆键合、微转印和直接外延生长。

- 倒装芯片集成

倒装芯片集成技术是一种利用焊点实现芯片与承载晶圆或封装基板粘合和电连接的方法。该技术最早用于电子电路的集成，并在电子电路革命中逐渐成熟。然而，近年来，这一集成方法在 PIC 中也得到了广泛关注。

- 芯片/晶圆键合

芯片/晶圆键合技术是通过物理或化学相互作用连接两个或多个衬底或晶圆的过程。不同的晶圆表面通过原子相互反应或通过粘合剂中间层结合在一起。

- 微转印技术

如上所述，经典的异质集成方法依赖于芯片到晶圆或晶圆到晶圆的键合来集成 III-V 材

料。然而，这种方法对于 III-V 材料的利用效率很低，因为在大多数光学芯片中，III-V 光电组件所占的面积仅占电路面积的一小部此外，在单个芯片上集成不同的 III-V 层堆叠会因为键合芯片所需的最小尺寸而对掩模设计产生很大限制。2004 年，Menard 等提出了一种新技术即微转印技术，其可以将微米级薄膜组件从源基板转移到目标基板上。这项技术能够为在硅 PIC 上更低成本地集成 III-V 半导体材料或器件提供支持，因为它只在需要的地方提供 III-V 材料。

- 直接外延生长

晶圆键合技术提供了在单个晶圆上结合不同材料的自由，而转移印刷技术则更进一步降低了这一过程的成本，使其适用于中到大批量的应用。然而，能够在硅上外延生长并实现 III-V 激光器的单片集成仍然是最终目标。直接外延生长技术是使用分子束外延（MBE）、金属有机化学气相沉积（MOCVD）或气相外延（VPE）在 IV 族衬底上生长 III-V 族化合物半导体材料的技术

异质集成在制造精度、集成密度、产量和效率方面都有根本性的提高，经过十多年的发展，已迅速成为最受欢迎的片上源集成解决方案之一。

## 5.2 光计算

光子集成电路在人工智能计算中的潜力正在被挖掘，光学神经网络和光学加速器将成为新的研究热点。

随着硅基集成技术的发展，目前已经实现了可编程光导向逻辑计算芯片和光信息处理芯片[8]。在光逻辑计算芯片上，目前运算速度可达到 3Gbit/s，但是总体上集成程度较低，输入信号较少，尚无法实现大规模、多输入、可编程的光学逻辑计算。在光信息处理芯片上，目前主要通过热学调节实现移相功能，从而构建多种滤波器、微分器等功能。然而，由于热调节速度较慢，一般在 KHz 量级，且随着集成度的提升，功耗明显增加。

综上所述，硅光子学在实现大规模光信号处理器方面表现出巨大潜力。如果未来元件器件的可靠性和均匀性通过智能设计和先进制造工艺能得到极大提升，光子集成芯片有望进一步扩展规模，在微波光子学、光通信和光计算等信号处理领域发挥重要作用。

## 六、总结展望

集成光学电路正在推动光通信和传感领域的技术革新，其小型化、高速化和低功耗特性使其在未来数据中心、光通信网络和传感器市场中具有广阔的应用前景。尽管面临材料、制造和系统集成的挑战，但随着异质集成技术的发展和新材料的引入，集成光学电路有望在未来十年内实现更大规模的商业化应用。

## 参考文献

- [1] 王洪炜, 孙璐, 张永, 等. 集成拓扑光子器件的研究进展 (特邀)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(19): 1913002.
- [2] Liang D, Bowers J E. Recent progress in lasers on silicon [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4: 511-517.
- [3] 陈必更, 李科, 赵奕儒, 等. 硅基电光调制器研究进展 (特邀)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(19): 1913009.
- [4] Zhang J, Muliuk G, Juvert J, et al. III-V-on-Si photonic integrated circuits realized using micro-transfer-printing[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(11): 110803.
- [5] Wan Y T, Xiang C, Guo J, et al. High speed evanescent quantum-dot lasers on Si[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(8): 2100057.
- [6] Tossoun B, Kurczveil G, Zhang C, et al. Indiumarsenide quantum dot waveguide photodiodes heterogeneously integrated on silicon[J]. *Optica*, 2019, 6(10): 1277-1281.
- [7] 邱辞源, 马宁, 陈雨, 等. 硅基可编程多功能光子芯片研究进展和展望 (特邀)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(19): 1913013.
- [8] 谢意维, 吴佳辰, 琚新琰, 等. 面向大规模可编程硅基光信号处理器 (特邀)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(19): 1913010.
- [9] 高旭, 常林. 异质集成 Si/III-V 族半导体激光器研究进展 (特邀)[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(19): 1913004.
- [10] Soref R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 2006, 12(6): 1678-1687.
- [11] Goell J E, Standley R D. Integrated optical circuits[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(10): 1504-1512.
- [12] Pérez-López D. Large-scale programmable integrated photonic circuits: from microwave photonics to optical computing[C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2022: 1-3.