



综述

## 硅基光电子在通信中的应用和挑战

李德钊<sup>1</sup>, 许鹏飞<sup>2</sup>, 朱科健<sup>2</sup>, 周治平<sup>2,3</sup>

(1. 北京爱杰光电科技有限公司, 北京 100190; 2. 北京大学, 北京 100871;  
3. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 硅基光电子技术拥有光的宽带、高速和抗干扰特性以及微电子技术在大规模集成、低能耗、低成本等方面的优势。最近十年, 硅基光电子技术开始进入通信产业领域, 在 800 Gbit/s 以上的高速短距应用场景中发挥优势, 对传统磷化铟 (InP) 的通信光模块形成挑战。浅谈硅基光电子技术在通信中的应用和发展, 同时简要介绍硅基光电子技术在应用中的一些挑战。解决器件性能、封装技术、自动化软件等方面的不足, 才能实现硅基光电子技术长足发展。

**关键词:** 硅基光电子学; 光通信; 技术挑战

**中图分类号:** TN304

**文献标识码:** A

**doi:**10.11959/j.issn.1000-0801.2021247

## Applications and challenges of silicon-based optoelectronics in communication

LI Dezha<sup>1</sup>, XU Pengfei<sup>2</sup>, ZHU Kejian<sup>2</sup>, ZHOU Zhiping<sup>2,3</sup>

1. Beijing Aijie Optoelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100190, China

2. Peking University, Beijing 100871, China

3. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract:** Silicon-based optoelectronics technology has the advantages of photonics, such as broadband, high-speed and anti-interference, as well as the advantages of microelectronics, such as large-scale integration, low energy consumption and low cost. Silicon-based optoelectronics is showing superior advantages in high-speed and short-reach communications and posing a challenge to the conventional indium phosphide (InP) optical modules. The application, development and technical challenges of silicon-based optoelectronics technology in communications were briefly discussed. There is an urgent need to develop high performance devices, packaging technology, automation software for further development of the silicon-based optoelectronic technology.

**Key words:** silicon-based optoelectronics, optical communication, technical challenge

### 1 引言

以硅材料为主导的微电子技术在过去半个多

世纪中取得了举世瞩目的成就, 一直是现代信息社会发展的驱动力。微电子芯片的发展遵从摩尔定律, 但随着微电子芯片的工艺节点向原子级靠

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-10-15

通信作者: 周治平, zjzhou@pku.edu.cn



近,量子效应对芯片性能的影响加剧,摩尔定律面临失效。人们使用多核处理器提高性能和降低功耗,然而总线的信号传输速度制约了处理器的处理能力<sup>[1]</sup>。传统的电互连由于电磁干扰和时延等原因,不能满足未来高速数据通信的需求。光通信具有抗电磁干扰、高传输率、低能耗、低时延等特性,光作为信息互联的媒介相对电信号来说具有先天的优越性<sup>[2-6]</sup>。20世纪70年代美国贝尔实验室的 Miller 提出了集成光学的概念<sup>[7]</sup>,其目标是在同一芯片中同时集成光器件和电器件。

随着早期互联网的发展,三、五族化合物半导体材料成为光通信的首选,并推动了光通信的发展<sup>[8]</sup>。这段时期集成化光通信芯片的主要材料是磷化铟(InP),InP 是直接带隙半导体,载流子迁移率高,可以直接制备高速半导体激光器、放大器和调制器等关键光电子器件。然而,铟是稀有材料,价格昂贵;InP 晶圆尺寸小、产量低,依赖复杂的外延工艺。这都抬高了基于 InP 材料的光通信芯片成本。当前 InP 光模块的成本约为 1 美元/(Gbit·s<sup>-1</sup>),难以进一步降低。

随着电信和互联网的进一步发展升级,5G、物联网、数据中心等应用需求使得光通信系统信道容量在过去 30 年中增加了 5 个数量级,如图 1

所示,光通信系统技术路线的升级依赖于技术的革新,光通信系统和调制格式越来越复杂。在当前主流的骨干网和数据中心通信系统中,基于相干通信技术和波分复用技术的 100 Gbit/s 光通信芯片和模块被大量应用<sup>[9-12]</sup>。未来光通信芯片和模块将向 400 Gbit/s、800 Gbit/s 甚至 Tbit/s (级别速率演进,迫切需要开发更高集成度、更低成本的光通信芯片和模块<sup>[13-16]</sup>。

除了长距离数据传输,硅基光电子还可以满足微电子芯片内/间的短距离大容量数据传输。通过与微电子集成电路进行单片集成,实现高速、低功耗的片上互连,突破目前的微电子处理器在数据互连上的瓶颈<sup>[17]</sup>。

## 2 发展应用

硅基光电子技术通过探讨微纳量级光子、电子及光电子器件在不同材料体系中的新颖工作原理,并使用与硅基集成电路工艺兼容的技术和方法,将它们异质集成在同一硅衬底上,形成一个完整的具有综合功能的新型大规模光电集成芯片。硅基光电子的发展始于 20 世纪 80 年代,Soref 发现了晶体硅中的等离子色散效应,为硅基电光调制提供了理论基础<sup>[18]</sup>。硅基光电子技术拥有光的极高带宽、超快速率和高抗干扰特性以及微电

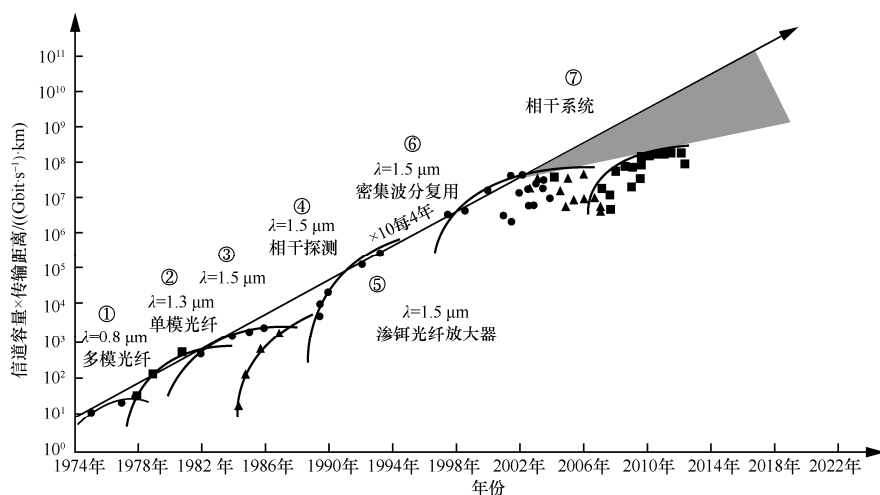


图 1 光通信系统的通信容量在过去 30 年中增加了 5 个数量级

子技术在大规模集成、低能耗、低成本等方面的优势,更适应未来高速、复杂的光通信系统<sup>[19-20]</sup>,如图 2 所示。Intel 预测,未来硅基光电子模块的预期成本可以降至 0.3 美元/(Gbit·s<sup>-1</sup>),相对于 InP 材料而言更具有成本优势。

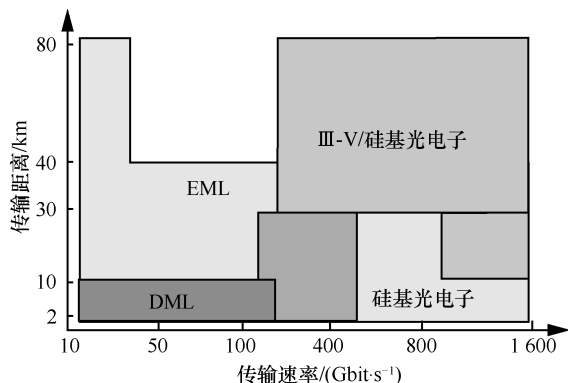


图 2 硅基光电子技术适合多通道的高速光通信

硅基光电子巨大潜能和商用价值逐渐受到业界认可,其中代表性的公司主要包括 Luxtera、Rockly、Intel、Acacia、Sicoya 等<sup>[21-23]</sup>,商业公司的加入大力推动了硅基光电子技术产业化发展。

Rockly 是早期致力于硅基光电子商业化的公司之一。Rockly 的硅基光电子芯片采用 3 μm 厚硅的技术路线<sup>[24-25]</sup>,充分发挥硅材料在无源器件方面的优势,与一般的 220 nm 薄硅技术路线相比, Rockly 将硅波导的损耗降低了一个数量级(约 0.2 dB/cm);且 3 μm 的厚硅波导尺寸与 InP 激光器模斑尺寸相近,便于和 InP 激光器混合集成,避开了硅材料在发光上的劣势;但其弊端在于无法通过掺杂的设计形成调制器,需要采用倒装焊(flip-chip bonding, FCB)的方式将 InP 的电吸收调制器集成到硅基光电子芯片上实现调制功能。

Luxtera(后被思科收购)也是早期从事硅基光电子通信芯片研究的公司, Luxtera 的硅基光电子芯片采用光栅耦合器作为输入/输出(I/O)端口,可以不经裂片直接对硅基光电子芯片进行晶圆级测试和封装,节约了整体成本。同时, Luxtera

的硅基光电子芯片封装技术也较为领先,通过到 FCB 的方式将激光器芯片和专用集成电路(ASIC)芯片混合贴装在硅基光电子芯片表面形成完整的硅基光电子收/发芯片引擎,降低了后端光模块封装的难度<sup>[26-28]</sup>。

Intel 于 2016 年发布了基于硅基光电子的首款 50 Gbit/s 光发射和接收模块。Intel 的硅基光电子芯片采用了特殊的倏逝波耦合结构,利用自身的工艺能力,使得硅基光电子波导和 InP 芯片共同构成激光器谐振器(可以通过调整硅基光电子波导的结构改变工作波长,同时避免了光模场的对准问题),大大降低了整体的封装成本<sup>[29-32]</sup>。Intel 于 2018 年推出的 100 Gbit/s PSM4 QSFP28 硅基光电子收发模块,也是近年来硅基光电子通信应用领域最成功的产品之一,累计出货量超 300 万只。

Acacia 在硅基光电子的长距离应用上处于领先地位,是最早推出 100 Gbit/s 相干硅基光电子收发模块的公司<sup>[9,33]</sup>,具备相干数字信号处理(digital signal processing, DSP)芯片设计能力及业内领先的硅基光电子单片集成及封装工艺。于 2018 年发布的 AC1200 模块是首次实现 6 600 km 超长距离 400 Gbit/s 速率信号传输的硅基光电子模块。

Sicoya 是采用单片集成路线的硅基光电子芯片公司,利用 IHP 公司开发的锗硅双极互补金属氧化半导体(GeSi BiCMOS)工艺,将微电子集成电路(如驱动器(Driver)、跨阻放大器(TIA)等)和硅基光电子芯片集成在同一块硅片上<sup>[34-35]</sup>,提升了整体性能。一方面,大大缩短了高频信号在驱动器和调制器之间的传输距离,降低了发射端的功耗;另一方面,由于光探测器和放大器之间的信号路径缩短,接收端具有更高的信噪比。

近年来,我国的硅基光电子产业发展十分迅速,基础研究不断取得突破、技术标准相继形成、产业链不断完善、产品解决方案日趋完善。部分硅基光电子技术基础研究接近国际一流水平,部分关键产品已基于自主研发实现了产业化突破<sup>[36-39]</sup>,



2018—2020 年, 国家信息光电子创新中心联合产业力量先后推出 100 Gbit/s 硅基光电子芯片和 4×200 Gbit/s 硅基光电子发射机, 实现技术突破<sup>[40-43]</sup>。此外, 光迅、华为、阿里巴巴、海信、亨通 Rockley、赛勒光电等企业正在进入硅基光电子市场, 相继展示了自主研发的硅基光电子产品。

### 3 市场前景

硅基光电子技术市场前景十分广阔, 根据市场研究机构 Yole 的数据<sup>[44]</sup>, 2020 年, 基于硅基光电子技术的产业总体市场规模大约为 8 000 万美元。到 2026 年, 预计硅基光电子技术的产业总体市场规模将快速增长至 11 亿美元, 2020—2026 年均复合增长率高达 49%。硅基光电子不同应用场景市场规模预估如图 3 所示。

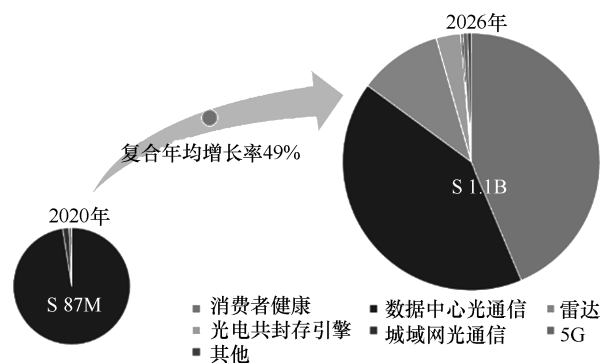


图3 硅基光电子不同应用场景市场规模预估

硅基光电子技术应用场景分布广泛, 在通信、激光雷达<sup>[45-46]</sup>、传感<sup>[47]</sup>以及人工智能光计算<sup>[48]</sup>等方面已有产业化的趋势。特别是在 2021 年, Rockley 与苹果公司合作开发基于硅基光电子的分光光度计, 可用于测量人体乳酸、体温、血压、血氧和心率等数据。预计将在智能手表上搭载该器件, 开启了硅基光电子技术在消费电子方面的产业化进程, 预计在 2026 年, 硅基光电子在消费电子领域的市场规模将占据硅基光电子产业总市场规模的 43%。

截至目前, 硅基光电子技术最成熟的应用场

景仍然是光通信行业。2020 年, 用于光通信的硅基光电子收/发器市场规模占硅基光电子技术产业总市场的 98.9%。产品主要应用于数据中心光互联、长距离骨干网光互联和 5G 前传等。其中数据中心是硅基光电子模块最主要应用场景。数据中心通信连接数量大、节点间距离短、环境温度相对稳定、对光模块的成本敏感, 硅基光电子在数据中心应用优势明显。因此用于数据中心光通信的硅基光电子收/发器占硅基光电子在光通信市场总规模的 97%。到 2026 年, 预计硅基光电子技术在光通信领域的主要应用仍将集中于数据中心光通信, 并以 26% 的年复合增长率实现 4.5 亿美元左右的市场规模。

除了数据中心的应用外, 长距离骨干网市场总体容量有限; 而 5G 应用场景对光模块的温度稳定性要求较高。同时现阶段硅基光电子芯片封装的良品率较低、封装成本高, 硅基光电子模块总体成本相比于传统 InP 材料光模块没有显著优势。市场出于对成本和稳定性的考虑, 在 5G 应用下硅基光电子模块的占比较少。

进一步推动硅基光电子技术的产业化进展面临着一系列挑战。

### 4 挑战

传统光通信模块多使用 InP 材料, 为了降低产品升级迭代的成本, 要求硅基光电子的产品需要具有对 InP 光模块的兼容能力。但由于硅材料本身的特征, 例如硅基光电子芯片不能发光、没有高效率的一阶电光效应、硅波导的有效折射率对温度敏感等, 这些都限制了硅基光电子模块的应用场景, 为了进一步扩大硅基光电子技术的应用范围和市场规模, 必须直面这些性能上的挑战。

硅基光电子技术具有集成度高的优势。同时, 较高集成度对封装技术也提出了更高的要求, 硅基光电子芯片的封装对精度要求高、技术难度大, 现阶段硅基光电子芯片的封装成本甚至占到了硅

基光电子模块总成本的 10% 左右。开发具有低成本、高可靠性的硅基光电子芯片封装技术是硅基光电子大规模产业化面临的挑战之一。

在硅基光电子芯片的研发制造上,目前的硅基光电子芯片设计多采用人工布局布线,从原理图到版图的准确性依赖于设计者的设计能力,容易出现错误。相对电引线而言,特殊的光波导布线要求会耗费大量时间。随着硅基光电子技术的发展,片上系统越来越复杂,特别是硅基光电子芯片和互补金属氧化物半导体 (CMOS) 芯片集成在同一芯片的单片集成应用场景下,人工进行布局布线和版图一原理图 (LVS) 验证越来越不具备可行性,硅基光电子芯片对自动化软件的需求越来越迫切。

综上所述,硅基光电子发展的主要挑战集中在器件的性能、封装和自动化设计等问题上<sup>[49-50]</sup>。

#### 4.1 部分器件技术难题

##### 4.1.1 片上光源

尽管学术界采用多种方法试图实现可以单片集成的硅基光源<sup>[51-52]</sup>,但目前硅基光电子技术产业界大多依然采用混合集成方案。激光器芯片采用 InP 材料,并与硅基光电子芯片在各自平台上独立制造,之后再行贴装。硅基片上光源一直没有得到真正的解决,成为制约硅基光电子学发展的瓶颈之一,硅的间接带隙特征给高效硅基光源的实现带来很大困难,实用化的片上硅基激光器是学术界和产业界长期奋斗的目标。

##### 4.1.2 调制器

应用在光通信领域的硅基光电子芯片需要小尺寸、低功耗、大带宽的硅基光电子调制器<sup>[53-54]</sup>。由于对温度不敏感,通信用硅基光电子芯片中一般以马赫-曾德尔调制器 (MZM) 为首选<sup>[55]</sup>,如图 4 所示。现阶段 MZM 的带宽获得了较大提升,已经实现了带宽高达 55 GHz 的宽带 MZM<sup>[56]</sup>,但在尺寸和功耗上仍需进一步发展。

MZM 是硅基光电子通信芯片上尺寸较大的单元器件,其尺寸一般在毫米级别。大的单元器件尺寸降低了晶圆产出也增大了微波信号的损耗。开发小尺寸的硅基电光调制器不仅能够降低成本,还能提高调制器性能。

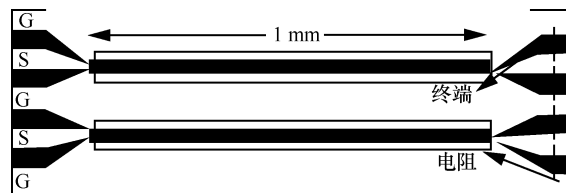


图 4 宽带的行波电极硅基马赫-曾德尔调制器

由于硅材料没有一阶电光效应,硅基电光调制器一般基于等离子体色散效应实现电光调制。等离子体色散效应调制效率较低,电光调制时所需的功耗较大<sup>[57]</sup>;同时,高速硅基 MZM 为了获得更高的带宽,通常采用耗尽式行波电极结构进行调制。耗尽式调制方式所需的直流偏置电压将会与行波电极终端的匹配电阻<sup>[58]</sup>形成直流回路,这一直流功耗导致高速硅基 MZM 的功耗进一步提高。为了降低高速调制器的损耗,研究人员采取了很多措施,比如采用特殊掺杂区结构的调制器<sup>[34,59-60]</sup>、采用分段集总式电极替代行波电极<sup>[61-62]</sup>、通过镂空衬底减小微波信号的损耗<sup>[63]</sup>、通过利用 CMOS 电路进行单片集成<sup>[64]</sup>和先进的封装技术降低损耗<sup>[65-66]</sup>等,硅基光电子芯片的能耗问题得到了一定程度的缓解。

##### 4.1.3 波分复用器件

波分复用器件通常要求波导拥有相对稳定的有效折射率,才能稳定地实现不同波长光信号的分/合波。硅是具有热光效应的材料,其热光系数大约为  $1.85 \times 10^{-4}$ ,普通硅基光电子波分复用器件需要额外的控制手段稳定器件工作时的环境温度,否则将会产生严重的工作波长的漂移或者通道串扰,但温度控制设备会增加光模块整体的功耗<sup>[67]</sup>。温度不敏感的波分复用器件是实现鲁棒波分复用的关键器件,业界采用了多种办法实现硅



基集成化波分复用器件,例如将反射式阶梯光栅结构引入硅基光电子芯片中<sup>[12]</sup>、通过特殊设计利用实现工作波长稳定的级联马赫—曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[68-71]</sup>等。目前硅基光电子芯片偏向于使用级联 MZI 的方案实现热稳定的波分复用器件,如图 5 所示,但基于级联 MZI 的波分复用器件难以符合局域网波分复用(LWDM)和中等波分复用(MWDM)等通道间隔较为密集的波分复用方案标准的要求。硅基集成的温度不敏感波分复用器件仍有待突破。

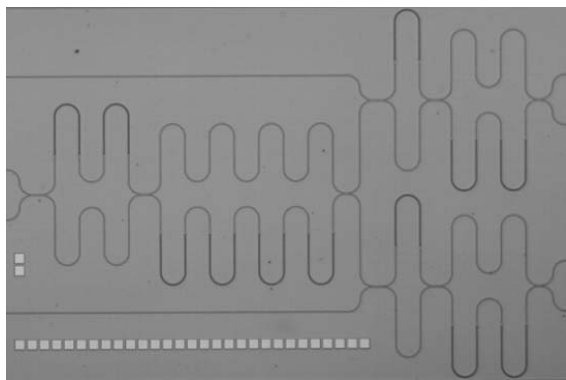


图5 温度不敏感片上波分复用器件

## 5 硅基光电子芯片封装技术

对硅基光电子芯片的封装主要分为高频电学封装和光学封装两部分。硅基光电子芯片的高频电学封装技术和微电子芯片的封装技术重合度较高,目前技术相对成熟<sup>[72-75]</sup>。但随着通道数量的增多和复杂信号调制格式的引入,引线电极越来越多,对外围封装板的 I/O 密度要求将会大幅度增加,封装难度也相应提升。

与硅基光电子芯片的电学封装相比,硅基光电子芯片的光学封装技术难度高、良品率低,是硅基光电子芯片封装技术的核心所在<sup>[76-77]</sup>。由于硅基光波导芯层和包层之间的折射率差异较大,单模硅基光波导尺寸较小,这一方面使得硅基光电子芯片的集成度比 InP 芯片集成度要高,同时也带来了硅基光波导和单模光纤模斑尺寸不匹配

的问题<sup>[78]</sup>,如图 6(a)所示。增大了硅基光波导和普通单模光纤耦合时的模斑失配损耗和位置误差损耗。为了满足光模块的出光功率要求,硅基光模块需要更高功率的激光器光源,衍生出能耗和散热控制方面的问题。为了应对这一挑战,学术界和产业界开发出多种片上波导模斑转换器<sup>[79-83]</sup>,将硅基光波导的模斑尺寸扩大到 5~8  $\mu\text{m}$ ,获得相对较好的效果。

另外,硅基光电子芯片通常将发射和接收多种功能集成在同一块芯片,使得硅基光电子芯片的光学 I/O 端口数量较多,通常使用光纤阵列实现硅基光电子芯片上光信号的耦合,如图 6(b)所示。封装使用的光纤阵列精确度也对光学耦合封装效果有较大影响。在使用光纤阵列封装时,光纤阵列中光纤之间的间距一般为 127  $\mu\text{m}$  或者 250  $\mu\text{m}$ <sup>[84]</sup>。封装使用的光纤阵列精确度也对光学耦合封装效果有较大影响。目前夹持光纤的 V 形槽的加工精度不够高,位置误差很有可能超过模斑范围,导致光纤阵列中的某一路甚至某几路无法精确对准。一般需要加工后通过测试挑选出精度较高的光纤阵列,良品率较低。

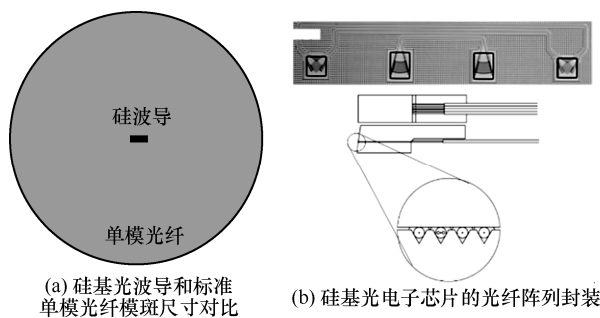


图6 硅基光电子芯片封装上的挑战

目前硅基光电子模块中针对硅基光电子芯片的封装成本大约要占到总成本的 10% 以上。需要开发新颖的高效率、低成本硅基光电子芯片耦合封装方式,才能进一步发挥硅基光电子模块的成本优势<sup>[85-89]</sup>。

## 6 自动化设计

相对于成熟的电子设计自动化 (electronic design automation, EDA) 工具来说, 硅基光电子芯片的设计工具目前正处于发展阶段, 硅基光电子芯片和微电子芯片不同, 直角等非连续弯曲几何形状的变化会引起光的散射和反射损耗。波导和波导之间的连接要求也要平滑过渡, 标准版图文件所支持的多边形与实际连续曲线之间存在细微的差异, 可能会影响光路性能<sup>[90]</sup>。

在硅基光电子芯片的研发设计方面, 由于硅基光电子单元器件的仿真比较复杂且工艺敏感, 如果不执行全面的器件仿真 (电磁、电光和热特性) 和工艺仿真 (TCAD)<sup>[91]</sup>, 很难确定版图上的器件能否实现原理图中所预设的功能。目前硅基光电子的设计依靠设计人员对所有细节的把控, 自动化程度较低。随着芯片集成度越来越高, 硅基光电子芯片对自动化软件的需求会越来越迫切。

国外 EDA 软件公司在传统 EDA 软件的基础上融合光学仿真与光器件工艺设计包 (PDK) 实现对硅基光电子芯片设计的支持, 这一方向发展迅速<sup>[92]</sup>。而国内目前基本没有专业从事 EDA 软件开发的商业机构, 尚处于起步阶段。

## 7 工艺平台

硅基光电子工艺流程基于标准 CMOS 工艺开发, 国外的 Intel、IMEC、IME、ePIXfab 等已在硅基光电子芯片加工制造方面具有多年技术积累, 而国内硅基光电子工艺平台处于起步阶段。重庆联合微电子、中科院微电子所、上海微技术工业研究院等单位正在致力于 8 英寸硅基光电子工艺线的建设<sup>[49-50]</sup>。

硅基光电子芯片对工艺的要求和微电子有所不同, 虽然目前硅基光电子芯片的工艺节点一般为 0.13  $\mu\text{m}$ , 但是由于硅基光电子器件尺寸小、硅

基光电子波导对侧壁光滑度要求高等原因<sup>[93-95]</sup>, 硅基光电子器件对工艺误差非常敏感, 几纳米的误差都有可能完全改变器件的性能<sup>[96]</sup>。不同代工厂对硅基光电子芯片的工艺误差控制能力不同, 同一设计在不同的工艺平台加工可能会具有完全不同的测试结果, 硅基光电子芯片设计的跨平台迁移能力弱, 使得代工厂的 PDK 器件库建设显得更加重要。

代工厂提供的 PDK 器件库是代工厂根据工艺条件反复优化后的结果, 其性能指标相对准确可靠。但目前硅基光电子的晶圆代工厂 PDK 套件通常仅包含 20~50 个基本单元, 且定制化程度低。不足以支撑复杂的硅基光电子芯片通信系统设计, 部分单元器件需要客户自行设计并进行多次流片优化, 硅基光电子芯片的器件库标准化建设仍有待完善<sup>[97]</sup>。同时, 硅基光电子芯片设计公司也需要和代工厂深度合作, 深入了解代工厂的工艺条件, 合作开发并完善器件库。

## 8 结束语

本文回顾了硅基光电子技术在光通信领域的应用和发展历史, 指出了硅基光电子技术对于光通信领域而言是新的历史机遇, 分析了硅基光电子技术目前的不足与挑战。硅基光电子技术的高集成度、低成本、与 CMOS 工艺兼容等特点将推动光通信进一步发展, 与此同时, 硅基光电子技术在器件性能、封装工艺和自动化设计等方面面临挑战, 硅基光电子技术的进一步发展有待于在这些难点上取得突破。

## 参考文献:

- [1] SODAN A C, MACHINA J, DESHMEH A, et al. Parallelism via multithreaded and multicore CPUs[J]. Computer, 2010, 43(3): 24-32.
- [2] BARWICZ T, BYUN H, GAN F, et al. Silicon photonics for compact, energy-efficient interconnects[J]. Journal of Optical Networking, 2007, 6(1): 63-73.
- [3] ZHOU Z P, CHEN R X, LI X B, et al. Development trends in



- silicon photonics for data centers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2018(44): 13-23.
- [4] ZHOU Z P, TU Z J, LI T T, et al. Silicon photonics for advanced optical interconnections[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(4): 928-933.
- [5] ZHOU Z P, TU Z J, YIN B, et al. Development trends in silicon photonics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(1): 76-81.
- [6] ZHOU Z P, WANG X J, YI H X, et al. Silicon photonics for advanced optical communication systems[C]//*SPIE OPTO. ProcSPIE 8630, Optoelectronic Interconnects XIII*. [S.l.:s.n.], 2013(8630): 198-210.
- [7] MILLER S E. Integrated optics: an introduction[J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, 48(7): 2059-2069.
- [8] SMIT M, WILLIAMS K, VAN DER TOL J. Past, present, and future of InP-based photonic integration[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(5): 050901.
- [9] CHEN L, DOERR C, AROCA R, et al. Silicon photonics for 100G-and-beyond coherent transmissions[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*. Washington, D.C.:OSA, 2016.
- [10] DOERR C, CHEN L, VERMEULEN D, et al. Single-chip silicon photonics 100-Gbit/s coherent transceiver[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference: Postdeadline Papers*. Washington, D.C.:OSA, 2014.
- [11] TU Z J, GONG P, ZHOU Z P, et al. Ultracompact 100 Gbit/s coherent receiver monolithically integrated on silicon[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2016, 55(4S): 04EC04.
- [12] ALDUINO A. Demonstration of a high speed 4-channel integrated silicon photonics WDM link with hybrid silicon lasers[C]//*Proceedings of 2010 IEEE Hot Chips 22 Symposium (HCS)*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-29.
- [13] DRISCOLL J B, DOUSSIÈRE P, ISLAM S, et al. First 400G 8-channel CWDM silicon photonic integrated transmitter[C]//*Proceedings of 2018 IEEE 15th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [14] YU H J, DOUSSIÈRE P, PATEL D, et al. 400Gbps fully integrated DR4 silicon photonics transmitter for data center applications[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020*. Washington, D.C.: OSA, 2020.
- [15] FATHOLOLOUMI S, NGUYEN K, MAHALINGAM H, et al. 1.6Tbit/s silicon photonics integrated circuit for co-packaged optical-IO switch applications[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020*. Washington, D.C.: OSA, 2020.
- [16] ZHONG K P, MO J Y, GRZYBOWSKI R, et al. 400 Gbps PAM-4 signal transmission using a monolithic laser integrated silicon photonics transmitter[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019*. Washington, D.C.: OSA, 2019.
- [17] SUN C, WADE M T, LEE Y, et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light[J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 534-538.
- [18] SOREF R, BENNETT B. Electrooptical effects in silicon[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(1): 123-129.
- [19] 周治平. 硅基光电子学及其应用[J]. *光学与光电技术*, 2018, 16(1): 6-10.
- ZHOU Z P. Silicon photonics and its applications[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2018, 16(1): 6-10.
- [20] 周治平, 杨丰赫, 陈睿轩, 等. 硅基光电子: 微电子与光电子的交融点[J]. *微纳电子与智能制造*, 2019, 1(3): 4-15.
- ZHOU Z P, YANG F H, CHEN R X, et al. Silicon photonics—a converging point of microelectronics and optoelectronics[J]. *Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2019, 1(3): 4-15.
- [21] SCARCELLA C, LEE J S, EASON C, et al. Plat4m: Progressing silicon photonics in Europe[C]//*Proceedings of the Photonics, F, 2016 Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. [S.l.:s.n.], 2016.
- [22] BOEUF F, CREMER S, TEMPORITI E, et al. Recent progress in Silicon Photonics R&D and manufacturing on 300mm wafer platform[C]//*Proceedings of 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [23] AOKI T, SEKIGUCHI S, SIMOYAMA T, et al. On-package high-density silicon photonics optical transceiver[C]//*Proceedings of 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [24] ZILKIE A J, SRINIVASAN P, TRITA A, et al. Multi-micron silicon photonics platform for highly manufacturable and versatile photonic integrated circuits[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5): 1-13.
- [25] SRINIVASAN P, MUTH K, MASUDA K, et al. Hybrid o-band electro-absorption modulators on multi-micron waveguide silicon photonics platform for optical engine applications[C]//*Proceedings of 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*. Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [26] DE DOBBELAERE P, AYAZI A, CHI Y, et al. Packaging of silicon photonics systems[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*. Washington, D.C.: OSA, 2014.
- [27] DE DOBBELAERE P, NARASIMHA A, MEKIS A, et al. Silicon photonics for high data rate optical interconnect[C]//*Proceedings of 2012 Optical Interconnects Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2012: 113-114.
- [28] DE DOBBELAERE P, ARMIJO G, BALARDETA J, et al. Silicon-photonics-based optical transceivers for high-speed interconnect applications[C]//*SPIE OPTO. ProcSPIE 9775, Next-Generation Optical Networks for Data Centers and Short-Reach Links III*. [S.l.:s.n.], 2016, 9775: 10-14.

- [29] FANG A W, PARK H, COHEN O, et al. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9203.
- [30] LIAO L, LIU A, RUBIN D, et al. 40 Gbit/s silicon optical modulator for high-speed applications[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(22): 1196.
- [31] PARK H, FANG A, KODAMA S, et al. Hybrid silicon evanescent laser fabricated with a silicon waveguide and III-V offset quantum wells[J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9460-9464.
- [32] WON R. Integrating silicon photonics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 498-499.
- [33] ZHANG H, ZHU B, PFAU T, et al. Real-time transmission of single-carrier 400 Gbit/s and 600 Gbit/s 64QAM over 200km-span link[C]//*Proceedings of 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019)*. [S.l.:s.n.], 2019: 1-3.
- [34] KUPIJAI S, RHEE H, AL-SAAD A, et al. 25 Gbit/s silicon photonics interconnect using a transmitter based on a node-matched-diode modulator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(12): 2920-2923.
- [35] MEISTER S, GREHN M, RHEE H, et al. Silicon photonics for 100 Gbit/s intra-data center optical interconnects[C]//*SPIE OPTO. ProcSPIE 9753, Optical Interconnects XVI*, [S.l.:s.n.], 2016(9753): 33-39.
- [36] ZHONGF, GONGP, ZHOU Z P, et al. High performance optical modulator and detector for 100 Gbit/s transmission system[J]. *ZTE Communications*, 2017, 15(3): 46-51.
- [37] ZHOU Z. Silicon photonics in China[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(12): 588-591.
- [38] ZHOU Z P, BAI B W, LIU L. Silicon on-chip PDM and WDM technologies via plasmonics and subwavelength grating[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(3): 1-13.
- [39] ZHOU Z P, YIN B, DENG Q Z, et al. Lowering the energy consumption in silicon photonic devices and systems[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): B28.
- [40] XIE C J, MAGILL P, LI D, et al. Real-time demonstration of silicon-photonics-based QSFP-DD 400GBASE-DR4 transceivers for datacenter applications[C]//*Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. Piscataway: IEEE Press, 2020:1-3.
- [41] ZHALEHPOUR S, LIN J C, GUO M Q, et al. All-silicon IQ modulator for 100 GBaud 32QAM transmissions[C]//*Proceedings of Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers 2019*. Washington, D.C.:OSA, 2019.
- [42] ZHANG H G, LI M F, ZHANG Y G, et al. 800 Gbit/s transmission over 1 km single-mode fiber using a four-channel silicon photonic transmitter[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(11): 1776.
- [43] HU Z P, SHAO S Z, XIAO Z X, et al. 100 Gbit/s PSM-4 silicon photonics transceiver for intra-datacenter on a 200-mm wafer[C]//*Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference/International Conference on Information Photonics and Optical Communications 2020 (ACP/IPOC)*. Washington, D.C.:OSA, 2020.
- [44] DEBRAY A, MALINGE J, MOUNIER E. Silicon Photonics-Market and Technology Report 2020[M]. Yole Développement, Apr, 2020.
- [45] POULTON C V, BYRD M J, RUSSO P, et al. Long-Range LiDAR and Free-Space Data Communication With High-Performance Optical Phased Arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5): 1-8.
- [45] POULTON C V, BYRD M J, RUSSO P, et al. Long-range LiDAR and free-space data communication with high-performance optical phased arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5): 1-8.
- [46] 庄东炜, 韩晓川, 李雨轩, 等. 硅基光电子集成光控相控阵的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 050001.
- [46] ZHUANG D W, HAN X C, LI Y X, et al. Silicon-based optoelectronic integrated optical phased array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050001.
- [47] FERNÁNDEZ GAVELA A, GRAJALES GARCÍA D, RAMIREZ J, et al. Last advances in silicon-based optical biosensors[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 285.
- [48] SHEN Y C, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. 2017 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM), 2017: 189-190.
- [49] 郝然. 对硅基光电子技术发展的思考[J]. *中兴通讯技术*, 2017, 23(5): 52-55.
- [49] HAO R. Development of the silicon photonic technology[J]. *ZTE Technology Journal*, 2017, 23(5): 52-55.
- [50] 杨建义, 王根成. 硅基光子技术发展的特点、机遇与挑战[J]. *中兴通讯技术*, 2017, 23(5): 47-51.
- [50] YANG J Y, WANG G C. Features, opportunities and challenges of silicon photonics[J]. *ZTE Technology Journal*, 2017, 23(5): 47-51.
- [51] ZHOU Z P, YIN B, MICHEL J. On-chip light sources for silicon photonics[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(11): e358.
- [52] 周治平, 王兴军, 冯俊波, 等. 硅基微纳光电子系统中光源的研究现状及发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(10): 28-35.
- [52] ZHOU Z P, WANG X J, FENG J B, et al. Research progress and development trends of light source for silicon based micro-nano optoelectronic systems[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(10): 28-35.
- [53] KANI J I, TERADA J, HATANNO T, et al. Future optical access network enabled by modularization and softwarization of access and transmission functions[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(9): D48-D56.
- [54] PETOUSI D, ZIMMERMANN L, GAJDA A, et al. Analysis of optical and electrical tradeoffs of traveling-wave depletion-type



- Si Mach-Zehnder modulators for high-speed operation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(4): 199-206.
- [55] DEROSE C T, TROTTER D C, ZORTMAN W A, et al. High speed travelling wave carrier depletion silicon Mach-Zehnder modulator[C]//Proceedings of 2012 Optical Interconnects Conference. Piscataway: IEEE Press, 2012:135-136.
- [56] LI M F, WANG L, LI X, et al. Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100 Gb/s applications[J]. Photonics Research, 2018, 6(2): 109.
- [57] LIU A S, JONES R, LIAO L, et al. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor[J]. Nature, 2004, 427(6975): 615-618.
- [58] XU H, LI X Y, XIAO X, et al. High-speed silicon modulator with band equalization[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4839-4842.
- [59] JAFARI O, SEPEHRIAN H, SHI W, et al. High-efficiency silicon photonic modulator using coupled Bragg grating resonators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(9): 2065-2075.
- [60] FANG Q, SONG J F, LIOW T Y, et al. Ultralow power silicon photonics thermo-optic switch with suspended phase arms[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(8): 525-527.
- [61] QI N, XIAO X, HU S, et al. Co-design and demonstration of a 25-Gbit/s silicon-photonic Mach-Zehnder modulator with a CMOS-based high-swing driver[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 131-140.
- [62] LI X B, YANG F H, ZHONG F, et al. Single-drive high-speed lumped depletion-type modulators toward 10 fJ/bit energy consumption[J]. Photonics Research, 2017, 5(2): 134.
- [63] XIAO XI M L. Substrate removed silicon mach-zehnder modulator for high baud rate optical intensity modulations[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. [S.l.:s.n.], 2016.
- [64] RITO P, GARCÍA LÓPEZ I, PETOUSI D, et al. A monolithically integrated segmented linear driver and modulator in EPIC 0.25  $\mu\text{m}$  SiGe: C BiCMOS platform[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(12): 4561-4572.
- [65] TIMURDOGAN E, SU Z, SHIUE R J, et al. 400G silicon photonics integrated circuit transceiver chipsets for CPO, OBO, and pluggable modules[C]//Proceedings of 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition(OFC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-3.
- [66] WADE M, ANDERSON E, ARDALAN S, et al. TeraPHY: a chiplet technology for low-power, high-bandwidth in-package optical I/O[J]. IEEE Micro, 2020, 40(2): 63-71.
- [67] LENTINE A L, DEROSE C T. Challenges in the implementation of dense wavelength division multiplexed (DWDM) optical interconnects using resonant silicon photonics[C]//Proceedings of Broadband Access Communication Technologies X. [S.l.:s.n.], 2016.
- [68] DENG Q Z, LIU L, ZHANG R, et al. Athermal and flat-topped silicon Mach-Zehnder filters[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29577.
- [69] HORST F, GREEN W M, ASSEFA S, et al. Cascaded Mach-Zehnder wavelength filters in silicon photonics for low loss and flat pass-band WDM (de-)multiplexing[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11652-11658.
- [70] KIM D W, BARKAI A, JONES R, et al. Silicon-on-insulator eight-channel optical multiplexer based on a cascade of asymmetric Mach-Zehnder interferometers[J]. Optics Letters, 2008, 33(5): 530-532.
- [71] JEONG S H, SHIMURA D, SIMOYAMA T, et al. Si-nanowire-based multistage delayed Mach-Zehnder interferometer optical MUX/DeMUX fabricated by an ArF-immersion lithography process on a 300 mm SOI wafer[J]. Optics Letters, 2014, 39(13): 3702.
- [72] LIU F M, YANG B B, LI B X, et al. A surface mounting embedded optical transceiver with Bi-directional data rate of eight channels $\times$ 10 Gbit/s[J]. Fiber and Integrated Optics, 2014, 33(1/2): 17-25.
- [73] DOERR C, HEANUE J, CHEN L, et al. Silicon photonics coherent transceiver in a ball-grid array package[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers. Washington, D.C.: OSA, 2017.
- [74] KNICKERBOCKER J U, PATEL C S, ANDRY P S, et al. 3-D silicon integration and silicon packaging technology using silicon through-vias[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2006, 41(8): 1718-1725.
- [75] BARWICZ T, LICHOUHAS T W, TAIRA Y, et al. Automated, high-throughput photonic packaging[J]. Optical Fiber Technology, 2018(44): 24-35.
- [76] PAVARELLI N, LEE J S, RENSING M, et al. Optical and electronic packaging processes for silicon photonic systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(5): 991-997.
- [77] KOPP C, BERNABÉ S, BAKIR B B, et al. Silicon photonic circuits: on-CMOS integration, fiber optical coupling, and packaging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(3): 498-509.
- [78] 周治平, 郜定山, 汪毅, 等. 硅基集成光电子器件的新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(2): 31-38.
- ZHOU Z P, GAO D S, WANG Y, et al. New progress of silicon-based integrated optoelectronic devices[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(2): 31-38.
- [79] NORIKI A, AMANO T, SHIMURA D, et al. 45-degree curved micro-mirror for vertical optical I/O of silicon photonics chip[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19749.
- [80] SNYDER B, MANGAL N, LEPAGE G, et al. Packaging and assembly challenges for 50G silicon photonics interposers[C]//Proceedings of 2018 Optical Fiber Communications

- Conference and Exposition (OFC). Piscataway: IEEE Press, 2018:1-3.
- [81] WOOD M, SUN P, REANO R M. Compact cantilever couplers for low-loss fiber coupling to silicon photonic integrated circuits[J]. Optics Express, 2012, 20(1): 164-172.
- [82] FANG Q, LIOW T Y, SONG J F, et al. Suspended optical fiber-to-waveguide mode size converter for Silicon photonics[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7763.
- [83] MARCHETTI R, LACAVA C, CARROLL L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips[J]. Photonics Research, 2019, 7(2): 201.
- [84] CARROLL L, LEE J S, SCARCELLA C, et al. Photonic packaging: transforming silicon photonic integrated circuits into photonic devices[J]. Applied Sciences, 2016, 6(12): 426.
- [85] LINDENMANN N, BALTHASAR G, HILLERKUSS D, et al. Photonic wire bonding: a novel concept for chip-scale interconnects[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17667-17677.
- [86] LINDENMANN N, BALTHASAR G, PALMER R, et al. Photonic wire bonding for single-mode chip-to-chip interconnects[C]//Proceedings of 8th IEEE International Conference on Group IV Photonics. Piscataway: IEEE Press, 2011: 380-382.
- [87] JIMENEZ GORDILLO O A, CHAITANYA S, CHANG Y C, et al. Plug-and-play fiber to waveguide connector[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20305.
- [88] BUSCAINO B, TAYLOR B D, KAHN J M. Multi-Tbit/s-per-fiber coherent co-packaged optical interfaces for data center switches[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3401-3412.
- [89] MINKENBERG C, KRISHNASWAMY R, ZILKIE A, et al. Co-packaged datacenter optics: opportunities and challenges[J]. IET Optoelectronics, 2021, 15(2): 77-91.
- [90] BOGAERTS W, CHROSTOWSKI L. Silicon photonics circuit design: methods, tools and challenges[J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(4): 1700237.
- [91] CHROSTOWSKI L, HOCHBERG M. Silicon photonics design[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [92] CHROSTOWSKI L, SHOMAN H, HAMMOOD M, et al. Silicon photonic circuit design using rapid prototyping foundry process design kits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(5): 1-26.
- [93] LEE K K, LIM D R, LUAN H C, et al. Effect of size and roughness on light transmission in a Si/SiO<sub>2</sub> waveguide: experiments and model[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(11): 1617-1619.
- [94] LADOUCEUR F, LOVE J D, SENDEN T J. Effect of side wall roughness in buried channel waveguides[J]. IEEE Proceedings - Optoelectronics, 1994, 141(4): 242-248.
- [95] FEILCHENFELD N B, NUMMY K, BARWICZ T, et al. Silicon photonics and challenges for fabrication[C]// SPIE Advanced Lithography. Proc SPIE 10149, Advanced Etch Technology for Nanopatterning VI. [S.l.:s.n.]. 2017.
- [96] 郭进, 冯俊波, 曹国威. 硅光子芯片工艺与设计的发展与挑战[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(5): 7-10.
- GUO J, FENG J B, CAO G W. The progress and challenges of silicon photonics process and design[J]. ZTE Technology Journal, 2017, 23(5): 7-10.
- [97] ZHANG Y, BAEHR-JONES T, DING R, et al. Silicon multi-project wafer platforms for optoelectronic system integration[C]//Proceedings of 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP). Piscataway: IEEE Press, 2012: 63-65.

## [作者简介]



李德钊 (1990—), 男, 爱杰光电科技有限公司工程师, 主要研究方向为硅基光电调制器、硅基光通信芯片等。



许鹏飞 (1992—), 男, 北京大学在站博士后, 主要研究方向为硅基光电计算架构、硅基无源器件系统、硅基光电子芯片等。



朱科建 (1990—), 男, 北京大学在站博士后, 主要研究方向为光通信、硅基光电子器件、人工智能等。



周治平, 男, 博士, 北京大学教授, 主要研究方向为硅基光电子。