



信息通信领域产学研合作特色期刊 十佳皖刊  
第三届国家期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN

# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2020年4月·第2期

**专题：智能化通信应用芯片技术**



9 771009 686205

04>



# 《中兴通讯技术》第8届编辑委员会成员名单

**顾问** 侯为贵（中兴通讯股份有限公司创始人） | 钟义信（北京邮电大学教授） | 陈锡生（南京邮电大学教授）

**主任** 陆建华（中国科学院院士）

**副主任** 李自学（中兴通讯股份有限公司董事长） | 糜正琨（南京邮电大学教授）

## 编委（按姓名拼音排序）

陈建平	上海交通大学教授	唐雄燕	中国联通网络技术研究院首席科学家
陈前斌	重庆邮电大学教授、副校长	陶小峰	北京邮电大学教授
葛建华	西安电子科技大学教授	王文博	北京邮电大学教授、副校长
管海兵	上海交通大学教授	王文东	北京邮电大学教授
郭庆	哈尔滨工业大学教授	王喜瑜	中兴通讯股份有限公司执行副总裁
洪波	中兴发展股份有限公司总裁	王翔	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
洪伟	东南大学教授	卫国	中国科学技术大学教授
黄宇红	中国移动研究院副院长	吴春明	浙江大学教授
纪越峰	北京邮电大学教授	邬贺铨	中国工程院院士
江涛	华中科技大学教授	肖甫	南京邮电大学教授
蒋林涛	中国信息通信研究院科技委主任	解冲锋	中国电信新兴信息技术研究所总工程师
李尔平	浙江大学教授	徐安士	北京大学教授
李红滨	北京大学教授	徐子阳	中兴通讯股份有限公司总裁
李厚强	中国科学技术大学教授	续合元	中国信息通信研究院副总工
李建东	合肥工业大学教授、副校长	薛向阳	复旦大学教授
李军	清华大学教授	薛一波	清华大学教授
李乐民	中国工程院院士	杨义先	北京邮电大学教授
李融林	华南理工大学教授	杨震	南京邮电大学教授、原校长
李少谦	电子科技大学教授	叶茂	电子科技大学教授
李自学	中兴通讯股份有限公司董事长	易芝玲	中国移动研究院首席科学家
林晓东	中兴通讯股份有限公司副总裁	张宏科	北京交通大学教授
刘健	中兴通讯股份有限公司高级副总裁	张平	中国工程院院士
刘建伟	北京航空航天大学教授	张卫	复旦大学教授
陆建华	中国科学院院士	张云勇	中国联通研究院院长
马建国	广东工业大学教授	赵慧玲	工业和信息化部科技委信息网络专家组组长
孟洛明	北京邮电大学教授	郑纬民	中国工程院院士
糜正琨	南京邮电大学教授	钟章队	北京交通大学教授
任品毅	西安交通大学教授	周亮	南京邮电大学教授
石光明	西安电子科技大学教授、副校长	朱近康	中国科学技术大学教授
孙知信	南京邮电大学教授	祝宁华	中国科学院半导体研究所研究员
谈振辉	北京交通大学教授		

# 目次

中兴通讯技术 (ZTE TECHNOLOGY JOURNAL)  
总第 151 期 第 26 卷 第 2 期 2020 年 4 月

## 专题：智能化通信应用芯片技术

智能光子处理系统：概念与研究进展 02  
邹卫文，马伯文，徐绍夫

面向 6G 的可见光通信 11  
迟楠，贾俊连

智能微波光子射频前端与链路 20  
邹喜华，李沛轩，刘丰玮

自动锁模光纤激光器研究进展 28  
义理林，张力，蒲国庆

半导体智能视觉系统芯片 38  
吴南健

硅基集成激光雷达技术 43  
王鹏飞，罗光振，潘教育

51 智能硅基多维复用与处理芯片  
王健，郑爽，曹晓平

64 智能化可重构硅光集成器件及芯片应用研究  
谢意维，张涛，戴道铨

## 专家论坛

70 下一代非易失性硅基集成光开关探讨  
周林杰

## 企业视界

74 5G 场景化网规方案探讨  
邹广玲，潘彩华

## 2020 年第 1—6 期专题计划及策划人

### 1. 蜂窝车联网产业与技术

中国移动通信研究院首席科学家 易芝玲  
中国移动通信研究院技术经理 潘成康

### 2. 智能化通信应用芯片技术

中国科学院半导体研究所研究员 祝宁华  
中国科学院半导体研究所研究员 李明

### 3. 5G 核心网技术与挑战

工业和信息化部科技委  
信息网络专家组组长 赵慧玲

### 4. 无线网络空中计算

中国科学技术大学教授 卫国

### 5. 网络人工智能技术

电子科技大学教授 虞红芳

### 6. 工业互联网技术与应用

中国信息通信研究院副总工 续合元

# CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 26 No. 2 Apr. 2020

## Special Topic: Intelligent Communication Chip Technology

Intelligent Photonic Processing System: **02**  
Concept and Research Progress  
ZOU Weiwen, MA Bowen, XU Shaofu

Visible Light Communication Towards 6G **11**  
CHI Nan, JIA Junlian

Intelligent Microwave Photonic RF Frontends and Links **20**  
ZOU Xihua, LI Peixuan, LIU Fengwei

Research Progress of **28**  
Automatic Mode-Locking Fiber Laser  
YI Lilin, ZHANG Li, PU Guoqing

Semiconductor Smart Vision System Chips **38**  
WU Nanjian

Silicon-Based Integrated LiDAR Technology **43**  
WANG Pengfei, LUO Guangzhen, PAN Jiaoqing

**51** Intelligent Silicon-Based Multi-Dimensional  
Multiplexing and Processing Chips  
WANG Jian, ZHENG Shuang, CAO Xiaoping

**64** Applications of Intelligent Reconfigurable Silicon  
Photonic Devices and Circuits  
XIE Yiwei, ZHANG Tao, DAI Daoxin

## Expert Forum

**70** Next Generation Nonvolatile Silicon Integrated  
Optical Switch  
ZHOU Linjie

## Enterprise View

**74** 5G Scenario Network Planning Schem  
ZOU Guangling, PAN Caihua

期刊基本参数: CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*78\*zh\*P\* ¥ 20.00\*15000\*10\*2020-04

## 敬告读者

本刊享有所发表文章的版权, 包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权, 所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。未经本刊许可, 不得以任何形式全文转载本刊内容; 如部分引用本刊内容, 须注明该内容出自本刊。



# 智能化通信应用芯片技术专题导读



## 专题策划人 祝宁华



中国科学院半导体研究所研究员、国家“863”计划信息领域微电子与光电子主题专家、国家自然科学基金委国际合作咨询专家组成员、“十三五”国家重点专项“光电子与微电子器件及集成”专家组组长；主要从事光电子器件研究工作，成功研发一系列高速激光器件与模块；研究成果获国家技术发明二等奖、光学工程学会科技一等奖、中国通信学会科学技术一等奖、中国科学院杰出科技成就奖（个人）和光华工程科技奖；发表 SCI 论文 200 余篇，出版专著 3 部，获授权发明专利 100 余项（含美国专利 4 项）。

## 专题策划人 李明



中国科学院半导体研究所研究员、所长助理，《半导体学报》常务副主编，中国电子学会青年科学家俱乐部半导体科技专委会主任委员；2013 年入选中国海外高层次人才引进计划，2015 年获国家自然科学基金优秀青年基金，2019 年获国家自然科学基金杰出青年基金；研究方向为微波光子器件和光子模拟信号处理器件；发表 SCI 论文 120 余篇。

随着网络技术的飞速发展，“大智移云”（大数据、智能化、移动互联网和云计算）时代的来临，无人驾驶与智能机器人的兴起，以及空天地一体化信息整合步伐的加快，光电技术已经覆盖信息产生、获取、传输、交换与处理等各个环节，并通过深度融合产生各种新的应用领域，呈现“井喷式”的发展态势。光通信系统是新一代信息技术发展的基础，其发展水平决定着新一代信息技术的演进步伐。LightCounting 数据显示，近 5 年全球移动数据量年增长率为 60%，但光电子器件的带宽年增长率仅约为 10%。器件带宽增长与数据量增长不匹配的矛盾愈来愈凸显。面对未来发展趋势，急需研发高速率、大容量的新型光电子器件，以支撑光通信产业的可持续发展。同时，随着无人驾驶、智慧城市等新应用场景的涌现，急需发展智能化程度更高的光电子器件。

随着人工智能技术蓬勃发展，智能化已成为近年来各行各业发展的一个趋势。人工智能与光子学相结合成为光学与光电子领域的研究热点。与电子技术比较，光子技术具有传输速率高、可并行、带宽大以及功耗低等特点。智能化光子技术被认为是突破大算力和高能效等发展瓶颈的关键技术

之一。具有高维度并行计算内禀性和超强计算能力的光计算技术有望成为未来大容量信息系统的核心。硅基光子集成在过去十多年内得到了飞速发展。通过硅基光子集成将光场束缚在微纳尺度的芯片结构上，利用硅基光子在计算和传输时大带宽、低功耗的优势，为实现芯片级光子神经网络提供新的思路。半导体智能视觉系统芯片将光信号获取与智能化处理相结合，具备实现或超越人类视觉系统功能的潜力，被广泛应用于各类智能化信息获取应用场景。最近，基于智能化算法的新型光纤激光器得到广泛报道。将传统光学与光电子技术同人工智能算法相结合以提升光学系统性能，是人工智能赋能传统技术的典型代表。

本期专题就智能化通信应用芯片技术的发展现状和趋势开展讨论，论文来自该领域研究优势单位的专家学者。这期论文凝聚了他们最新的研究成果和工作经验，希望能给读者提供有益的参考和启示。

祝宁华 李明

2020 年 4 月 21 日

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002001

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.TN.20200424.1624.002.html>

网络出版日期: 2020-04-24

收稿日期: 2020-04-19

# 智能光子处理系统： 概念与研究进展

## Intelligent Photonic Processing System: Concept and Research Progress



邹卫文 /ZOU Weiwen, 马博文 /MA Bowen, 徐绍夫 /XU Shaofu

(上海交通大学, 上海 200240)

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**摘要:** 提出了智能光子处理系统 (IPS) 的概念, 该系统包括人工智能 (AI) 赋能的 IPS、光子辅助 AI 的 IPS 和神经拟态的 IPS。AI 赋能的 IPS 可实现更优的光子 / 光学系统信号处理性能; 光子辅助 AI 的 IPS 重点研究高速率、低能耗的 AI 计算加速器; 神经拟态的 IPS 将模拟人脑信息的处理机制, 同时具备适应和决策能力。回顾了 IPS 的最新研究进展, 并展望了其未来发展的挑战和机遇。

**关键词:** IPS; 深度学习; 人工智能; 光学神经网络; 神经拟态光子学

**Abstract:** An intelligent photonic processing system (IPS) is proposed, including artificial intelligence (AI)-powered IPS, IPS with photonics-facilitated AI, and Neuromorphic IPS. The AI-powered IPS aims to combine AI with existed photonic/optical systems for better signal processing performance. The IPS with photonics-facilitated AI focuses on the computing accelerator with high speed and low power consumption. The neuromorphic IPS features adaptation and decision-making abilities. For each version of IPS, several representative works are reviewed and some prospects for the future development are provided.

**Keywords:** IPS; deep learning; artificial intelligence; optical neural network; neuromorphic photonics

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200408.2030.002.html>

网络出版日期: 2020-04-09

收稿日期: 2020-02-03

随着“5G+”的业务场景不断扩大, 终端数据呈现爆炸式增长<sup>[1]</sup>, 智能处理技术将成为未来网络发展的核心要素。未来, 6G 技术将具有更高的传输速率和连接密度, 以及全空域全频谱通信、有线无线融合、网络一体化等关键特征<sup>[2]</sup>。智能处理技术将从

3 个层次与 6G 网络发展深度融合: 第一, 6G 技术将带来更加多样化的应用场景。针对不同场景的数据类型、不同业务的处理需求, 智能处理技术将与网络终端无缝衔接, 实现定制化的“场景智能”; 第二, 6G 环境下剧增的信息量将超出现有设备的处理极限。智能处理技术将实现宽带信号层面的有用信息提取, 大大降低端-端传输压力, 实现“信息智能”; 第三, 6G 网络吞吐量高, 并且呈现不同架构有

机融合、处理功能一体化等重要态势。智能处理技术将实现频谱资源的动态分配、网络接口的动态切换、网络拓扑的动态调控, 实现网络自治化管理的“网络智能”。因此, 在 5G/6G 浪潮的推动下, 我们对具有高速率、大带宽接口的智能处理技术展开研究至关重要。

光子具有带宽大、速率高、抗电磁干扰能力强、串扰低、传输损耗低等优点, 在很多领域中被广泛研究

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2019YFB2203700)、国家自然科学基金 (61822508)、中兴通讯产学研资助 (面向 6G 的信号处理架构及其演进路线研究)

并成功应用，如光通信、微波光子学（MWP）、光学成像、光学传感等。然而，传统光子处理系统在不断发展的过程中逐渐显现出性能瓶颈。例如，由于光电子器件的固有缺陷和并行化通道间的失配，微波光子处理系统的性能会随着复杂度和规模的增大而恶化<sup>[3]</sup>。此外，传统光子处理系统通常是针对特定的应用场景开发的，灵活性相对较低。在早期的研究中，功能可切换可编程的光子处理器得到了业界诸多关注<sup>[4]</sup>，这预示着功能可切换可编程的光子处理器具有极大的应用潜力；因此，未来的光子处理系统不但需要性能上的提高，而且需要更加灵活智能的任务执行方式。

AlphaGo 的出现<sup>[5-6]</sup>，标志着以深度学习和人工神经网络（ANN）为代表的人工智能（AI）技术开始在各领域广泛探索并纵深发展。当前，AI 技

术已被引入光学和光子学领域。AI 赋能的光子处理系统与传统方法优化后的光子处理系统相比，具有更出众的性能和鲁棒性，并有望在实际应用场景中大大降低传统光子处理系统的成本及人工操作难度。

可以预见，智能光子处理系统（IPS）是未来复杂环境中实现宽带智能信息处理的关键。

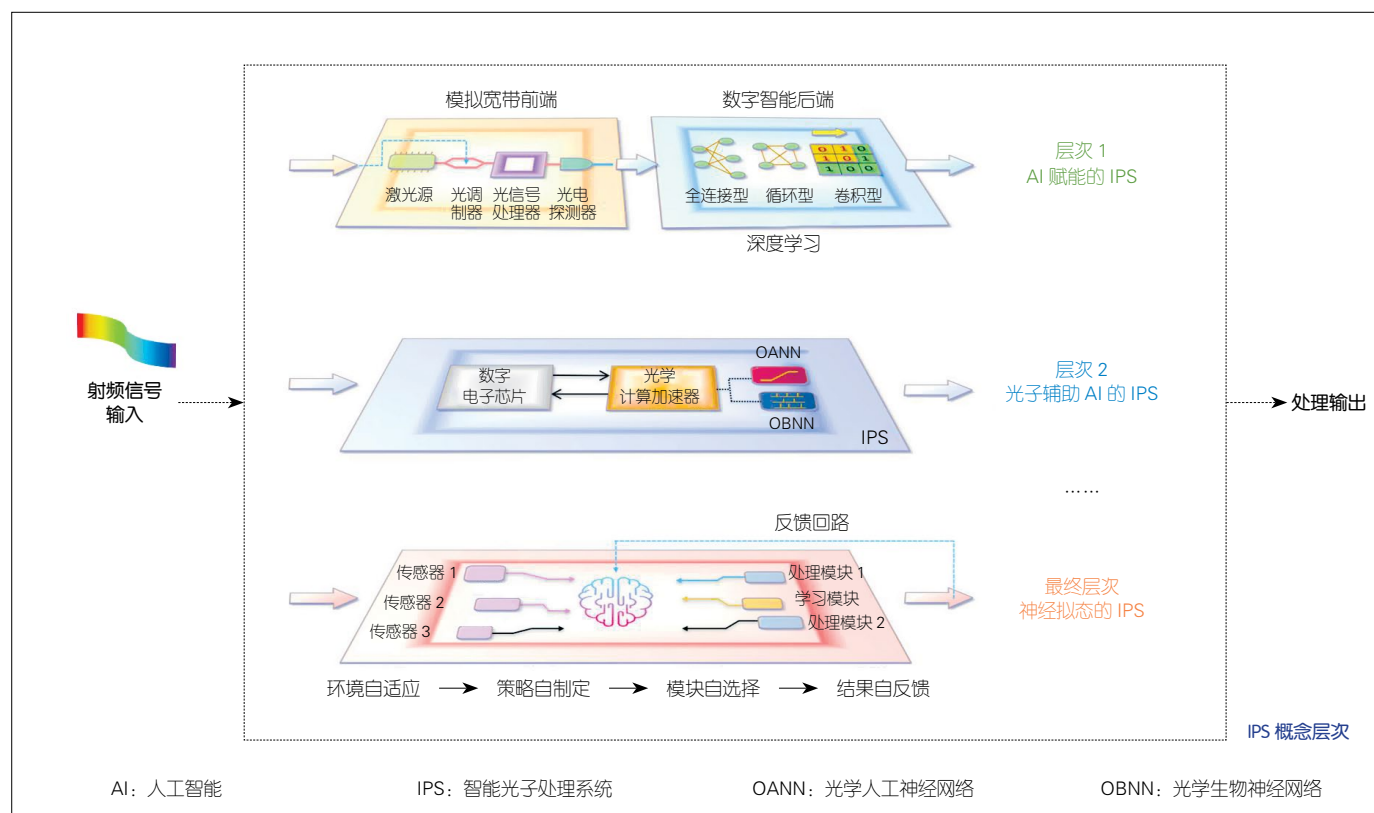
### 1 IPS 概念

随着光子技术和智能技术的不断融合，IPS 将从 AI 形态逐渐演变到神经拟态智能形态，并具有更高的通用性与能量效率。如图 1 所示，IPS 从层次上可分为 AI 赋能的 IPS、光子辅助 AI 的 IPS 和神经拟态的 IPS。在本节中，我们讨论了不同架构 IPS 的基本特性与实现方法。

首先，我们引入基于深度学习的

AI 技术来优化光子处理系统，即 AI 赋能的 IPS。如图 1（上侧）所示，IPS 由光子模拟宽带前端和数字智能后端组成。在实际的光子前端硬件中，噪声积累、光电转换非线性以及并行通道间失配等缺陷成为制约其性能提升的主要瓶颈，使得信噪比（SNR）严重下降。研究人员提出了基于硬件或软件的优化方法来提高 SNR<sup>[7-8]</sup>。然而，其优化效果受限于较低的灵活性和高昂的硬件成本。

引入 AI 技术是一种有望提高前端性能的灵活性方案。结合了深度学习的 ANN 擅长从参考信号（理想）和输出信号（非理想）构成的数据集中学习中间系统的系统响应与系统缺陷特征，从而构建复杂映射关系完成非理想信号的恢复。在训练成功的前提下，ANN 能够以较低的成本对宽带大动态范围的前端输出信号进行优化；



▲ 图 1 IPS 概念的不同架构示意图

因此, AI 赋能的 IPS 将可超越传统光子处理系统的性能, 对射频 (RF) 信号进行更有效的处理。

其次, 我们提出第 2 种 IPS 架构, 即通过光子方法辅助 AI 计算。如图 1 (中部) 所示, 光学人工神经网络 (OANN) 是光学计算加速器的发展方向之一。AI 中大量的计算操作 (如乘法和累加、多媒体接入控制) 已成为当前中央处理单元 (CPU) 的严重负担。随着摩尔定律不断逼近终点<sup>[9]</sup>, 针对计算框架的创新设计已是刻不容缓。光子因其具有高速率、高能效的特点成为极具潜力的新型技术: 首先, 电子时钟的速率仅为吉赫兹量级, 严重影响了 AI 计算中的时延性能; 而随着波分复用 (WDM)、高速调制等技术的成熟, 光学方法则能够以光速进行数据的并行化传递及处理。其次, 电子 AI 计算方案的能耗与输入矩阵维度的平方成正比, 使得能源成本和散热问题更加凸显<sup>[10]</sup>; 而光学无源结构则能够实现零能量消耗的超快光学计算。具体而言, 光子辅助 AI 的 IPS 的调制、探测带宽可达 100 GHz, 高出图形处理单元 (GPU)、张量处理单元 (TPU) 等电子 AI 专用计算单元两个数量级; 其单位 MAC 操作的能耗能够达到 pJ 量级, 甚至 aJ 量级, 有望低于 TPU 的 0.43 pJ/MAC 水平; 其时延水平更是低于 100 ps, 大大低于 TPU 的 2  $\mu$ s 运算时延<sup>[11]</sup>。因此, 通过将光学实现方法与 ANN 架构相结合, OANN 有望为 AI 提供更优质的计算平台, 大大提高 AI 的运行速度和效率, 进一步拓宽潜在的实时应用场景。

采用类脑通信和计算原理的光学生物神经网络 (OBNN) 是超低功耗光学计算加速器的候选方案。不同于 OANN 辅助 AI 的 IPS 在训练过程中的高能量消耗, 基于生物神经网络 (BNN) 的大脑只需要 20 W 的功率即可执行不

同的任务<sup>[12]</sup>。BNN 采用脉冲作为信息的表征方式<sup>[13]</sup>, 如图 1 (中部) 所示。与电子学方法相比, BNN 结构中单节点 (即神经元) 的带宽与互连密度之间的制衡突出了光子学方法的大带宽和低串扰的优势。进而, 得益于高能效的特点以及高速脉冲的产生能力, 光子学实现的 BNN 为开发超低功耗的计算框架带来了希望; 因此, OBNN 有望使 IPS 应用于更灵活的处理场景中, 如移动端应用。

最后, IPS 将接近神经拟态的终极形态——具有强大的感知和处理能力的“光子大脑”。大脑是高效智能信息处理系统的天然范例。神经拟态的 IPS 的特征如图 1 (下侧) 所示。第一, 神经拟态的 IPS 对环境表现出适应性。在不同的环境中, 输入信号会受到自然 (如温度) 或人为 (如干扰信号) 的影响, 需要通过各种“传感器” (如频率测量) 实现对输入信号的多维评估, 以正确理解输入信号的状态。第二, 处理策略由神经拟态的 IPS 的“大脑”制定。这一步骤的核心在于根据不同的输入信号以最简洁高效的途径实现处理目标。第三, 神经拟态的 IPS 选择必要的处理模块进行处理。神经拟态的 IPS 应当实现模块之间的协同以实现完整的处理功能, 而不是简单的功能叠加。第四, 神经拟态的 IPS 从输出结果中学习, 并产生经验。一个

高效的学习模块可以识别当前输出结果中的不足, 并对处理策略进行修正。因此, 具有光子宽带处理能力和智能学习决策能力的神经拟态 IPS 对未来信息处理系统至关重要。

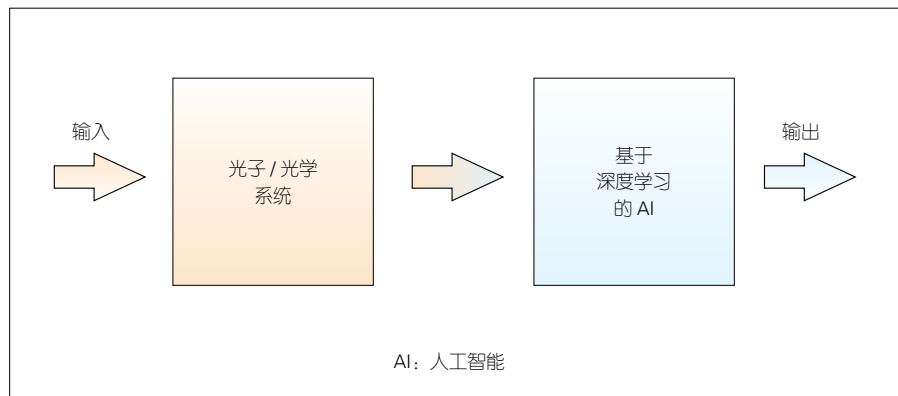
## 2 IPS 架构设计和关键技术的研究进展

近期, 研究人员逐步利用 AI 解决系统实际问题并开发用于 AI 计算的光学加速器。根据 AI 赋能的 IPS、OANN 和 OBNN 的层次划分, 本节中我们对 IPS 架构设计和关键技术的研究进展以及本课题组的相关研究进行回顾。

### 2.1 AI 赋能的 IPS

AI 赋能的 IPS 的典型架构如图 2 所示。不同的光子 / 光学系统可以作为前端, 例如光学成像系统、光学通信系统和光学传感系统等。特殊设计的 ANN 在经过训练后可以分析和处理前端的原始输出, 从而能够实现 AI 赋能的 IPS。

近年来, 研究人员尝试将 AI 与光学成像技术相结合<sup>[14]</sup>。AI 在光学成像领域的应用包括超分辨率成像<sup>[15]</sup>、端到端问题计算<sup>[16]</sup>、自动对焦<sup>[17]</sup>、光学切片<sup>[18]</sup>和降噪<sup>[19]</sup>等。在光通信和光网络领域, AI 的应用场景涉及到性能监视<sup>[20]</sup>、数据分析<sup>[21]</sup>、网络路由<sup>[22]</sup>、



▲图 2 AI 赋能的智能光子处理系统 (IPS) 的体系结构



失真改善<sup>[23]</sup>和调制识别<sup>[24]</sup>等。在传感领域, AI 通常被用来开发新颖的传感方案<sup>[25]</sup>, 进行传感器数据处理<sup>[26]</sup>。此外, AI 赋能的其他应用还包括集成光子器件设计<sup>[27]</sup>、纳米结构设计<sup>[28]</sup>、光子电路的高度并行仿真<sup>[29]</sup>和超短脉冲重建<sup>[30]</sup>。在 ANN 强大的映射近似能力的支撑下, 更多 AI 赋能的 IPS 将会不断涌现。

本课题组取得的进展包括深度学习赋能的光子模数转换器 (DL-PADC)<sup>[31]</sup>和卷积神经网络 (CNN) 优化的布里渊瞬时频率测量技术 (BIFM)<sup>[32]</sup>等。DL-PADC 架构示意如图 3 所示, 整体架构由光子前端系统、电子量化模块和深度学习数据恢复网络组成。图 3 的上侧给出了非线性、通道失配以及用于数据恢复的深度神经网络 (DNN) 的示意图<sup>[31]</sup>。实验结果表明 DL-PADC 的有效比特位数性能可优于先进的 ADC。此外, 针

对宽带信号测频需求, 我们提出了一种基于 CNN 的 BIFM 优化方法。实验结果显示, 由 CNN 建立的实测瞬时频率和理论瞬时频率之间的映射可以有效减少由 BIFM 系统缺陷引起的误差。

对于 AI 赋能的 IPS, 其研究难点是如何根据系统的特点采用适当的 ANN 结构和学习方法来设计高效的 IPS 架构。目前, 大部分相关工作中缺乏对所采用的 ANN 后端处理方法的有效评估, 如在实际应用中的实时性、训练成本和数据集的选取等问题。随着前后端匹配程度的提高, AI 赋能的 IPS 可以充分发挥光子技术的潜力并智能化地应用于真实场景。

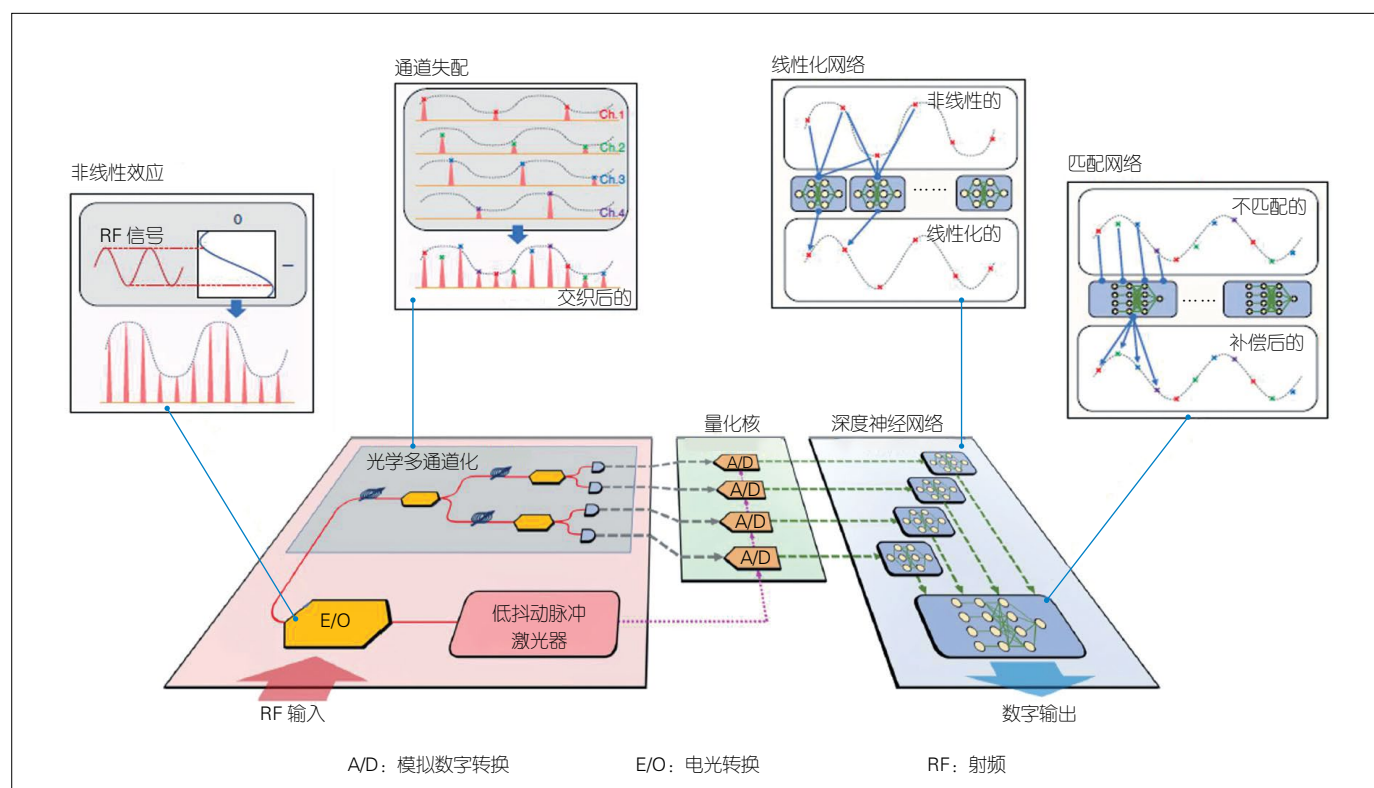
## 2.2 OANN

OANN 辅助 AI 的 IPS 体系结构如图 4 (a) 所示。数字电子芯片 (DEC) 首先将 AI 任务分配给 OANN, 经过光学流水式计算后, OANN 再将结果

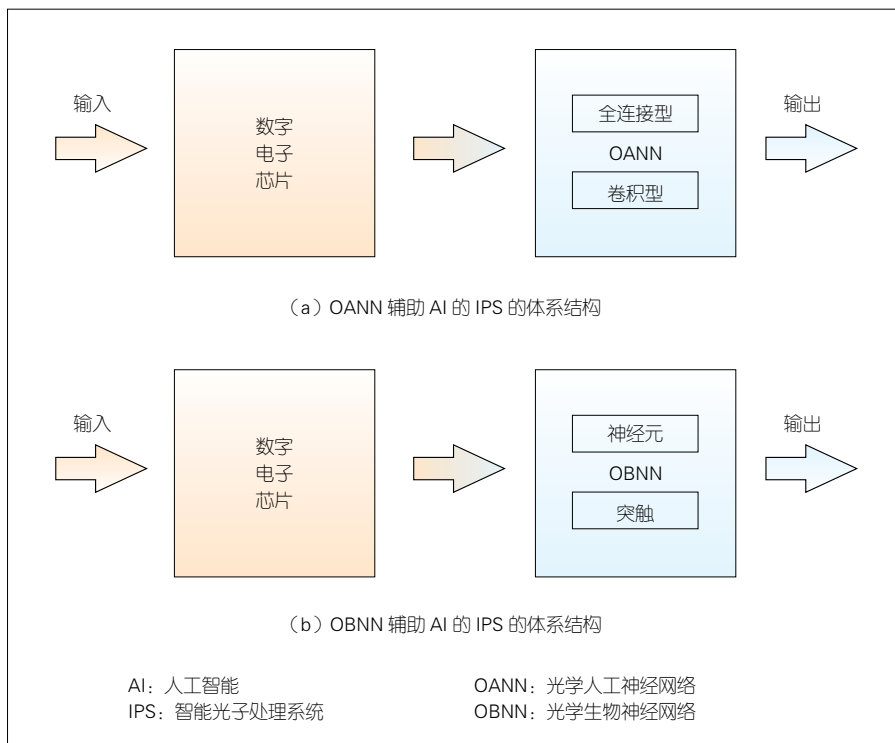
返还给 DEC。全连接和卷积 OANN 是最典型的研究方向。图 4 (b) 展示了采用 OBNN 辅助 AI 的 IPS 架构。与 OANN 不同, OBNN 中的基本单元是神经元和突触, 其研究多与神经拟态光子学相关<sup>[11]</sup>。

在文献 [33] 中, Y. C. SHEN 课题组率先提出了一种由马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 和移相器组成的级联架构, 用以实现矩阵乘法功能。X. LIN 等提出了一种基于全光学衍射的 OANN 方案<sup>[34]</sup>, 在手写数字识别 (MNIST) 的任务测试中实现了 91.75% 的识别精度。最近, R. HAMERLY 等研究了基于相干检测的可扩展 OANN, 该方案可以达到吉赫兹的速率, 并且能耗水平低至亚阿焦耳<sup>[35]</sup>。

除了全连接网络之外, 研究人员还专注于 CNN 的光学实现方法。在文献 [36] 中, 作者描述了使用微环谐振器 (MRR) 和 WDM 的数字电子和模



▲图 3 深度学习赋能的光子模数转换器架构示意图



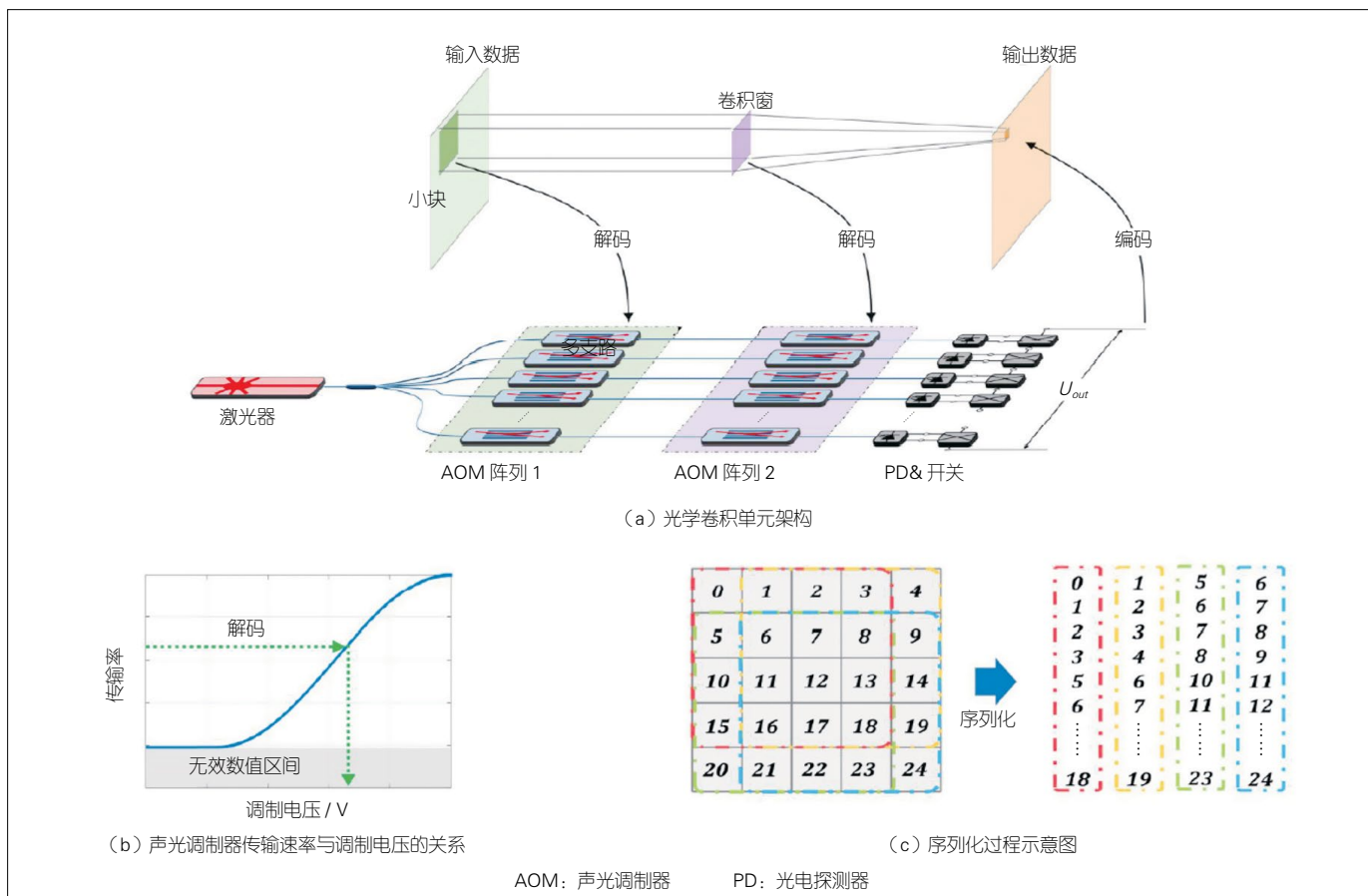
▲图 4 OANN 与 OBNN 辅助 AI 的 IPS 的体系结构

拟光子 CNN (DEAP-CNN) 架构。另外, 非线性激活函数的实现<sup>[37]</sup>有助于开发更完整的 OANN 硬件架构。而考虑到实际硬件的缺陷, 有效的训练方法<sup>[38]</sup>则成为 OANN 实现预期功能的关键。

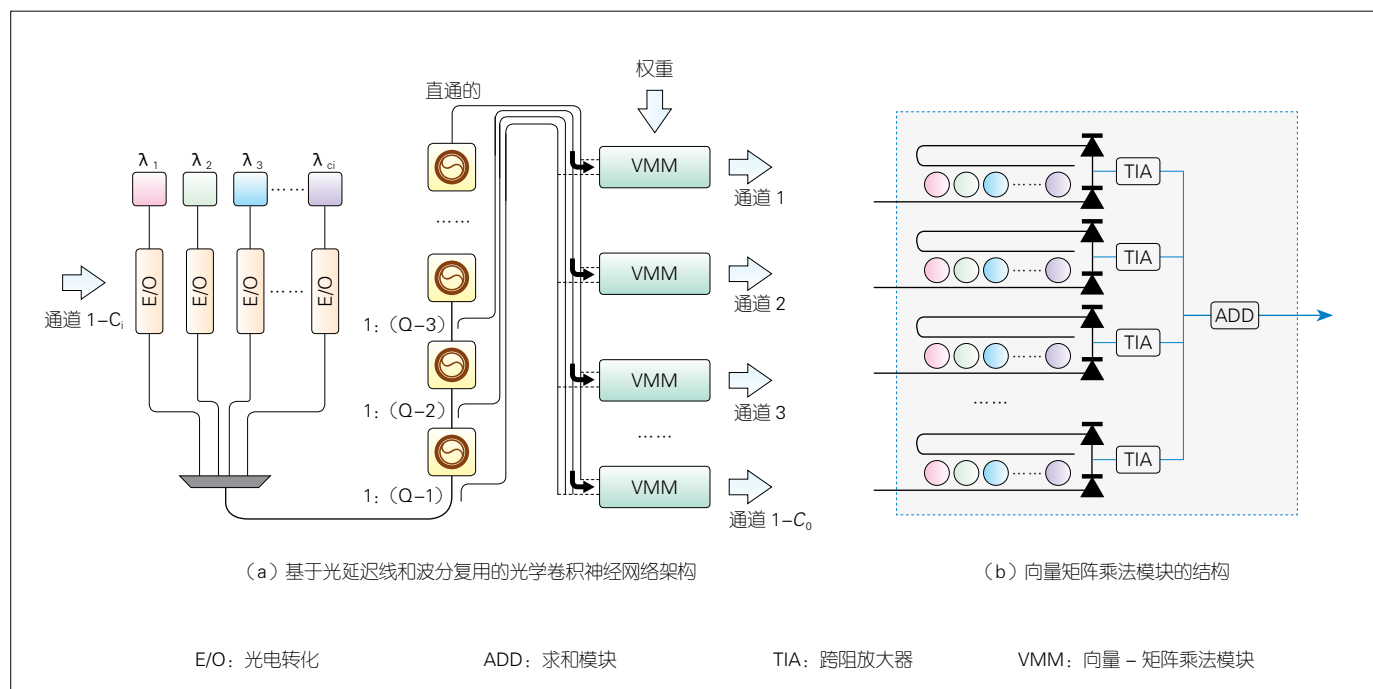
本课题组在 OANN 方面开展了部分研究工作, 其中包括高精度光学卷积单元<sup>[39]</sup>和高能效 CNN 的实现<sup>[40]</sup>。

图 5 为所提出的光学卷积单元基于声光调制器阵列架构<sup>[39]</sup>。通过硬件重用方案, 可以实现 CNN 的运算功能。在文献[40]中, 我们引入了延迟线来实现具有低延迟和低功耗的卷积操作, 如图 6 所示。通过对系统性能进行完善评估, 这种新架构的能效较之前提出的集成 OANN 架构提升了若干倍。

对于 OANN, 高效、紧凑、可编程、低功耗的网络架构需要进一步被



▲图 5 光学卷积单元基于声光调制器阵列架构



▲图6 高效比光学卷积神经网络架构

研究。同时，其研究重点将从概念性验证向集成化芯片转移。针对芯片化的 OANN，应注意集成难度会随着网络规模的扩大而增加，因此如何平衡集成难度和所需的计算能力是一个严峻的挑战。另外，研究者还应该关注 OANN 的计算生态系统构建，例如开发与主流计算框架匹配的通信接口。

### 2.3 OBNN

光子神经元作为 OBNN 的关键组成部分，受到研究者的广泛关注。在文献 [41] 中，M. A. NAHMIA 等证明了具有腔内可饱和吸收体 (SA) 的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 与泄漏-积分-发放 (LIF) 神经元模型的行为类似。关于可兴奋激光器作为光子神经元方案的相关综述请参考文献 [42]。突触在 BNN 中起到了动态调控网络行为的重要作用。Z. G. CHENG 等利用相变材料 (PCM) 实现了一种全光子突触 [43]。PCM 的非易失性使得光子突触不需要消耗静态能量。进一步，

以脉冲时刻依赖的突触可塑性 (STDP) 为代表的机制被认为与 BNN 的学习行为密切相关。研究人员采用各种光学效应，如交叉增益调制、饱和吸收和非线性偏振旋转等 [44]，尝试实现光子 STDP 算法。光学脉冲神经网络的研究则致力于将神经元、突触等基本单元进行组合架构。在文献 [45] 中，A. N. TAIT 等提出了一种用于可调节光脉冲处理的“广播-加权”系统架构，实现了光子神经元之间的高密度互连及加权操作。近期，J. FELDMAN 等还提出了一种基于 PCM 的全光脉冲神经网络 [46]，其具有超宽带运行的潜力。

本课题组在 OBNN 的研究中取得了一些进展。我们证明了常规的分布式反馈激光二极管 (DFB-LD) 可用于神经拟态信息处理，包括模式识别、单波长 STDP 实现和声音方位角测量。此外，我们还提出了一种基于 DFB-LD 的光子神经拟态网络，用于时空模式识别 [47]。如图 7 所示，在 STDP 学习模块的辅助下，该网络可以学习目

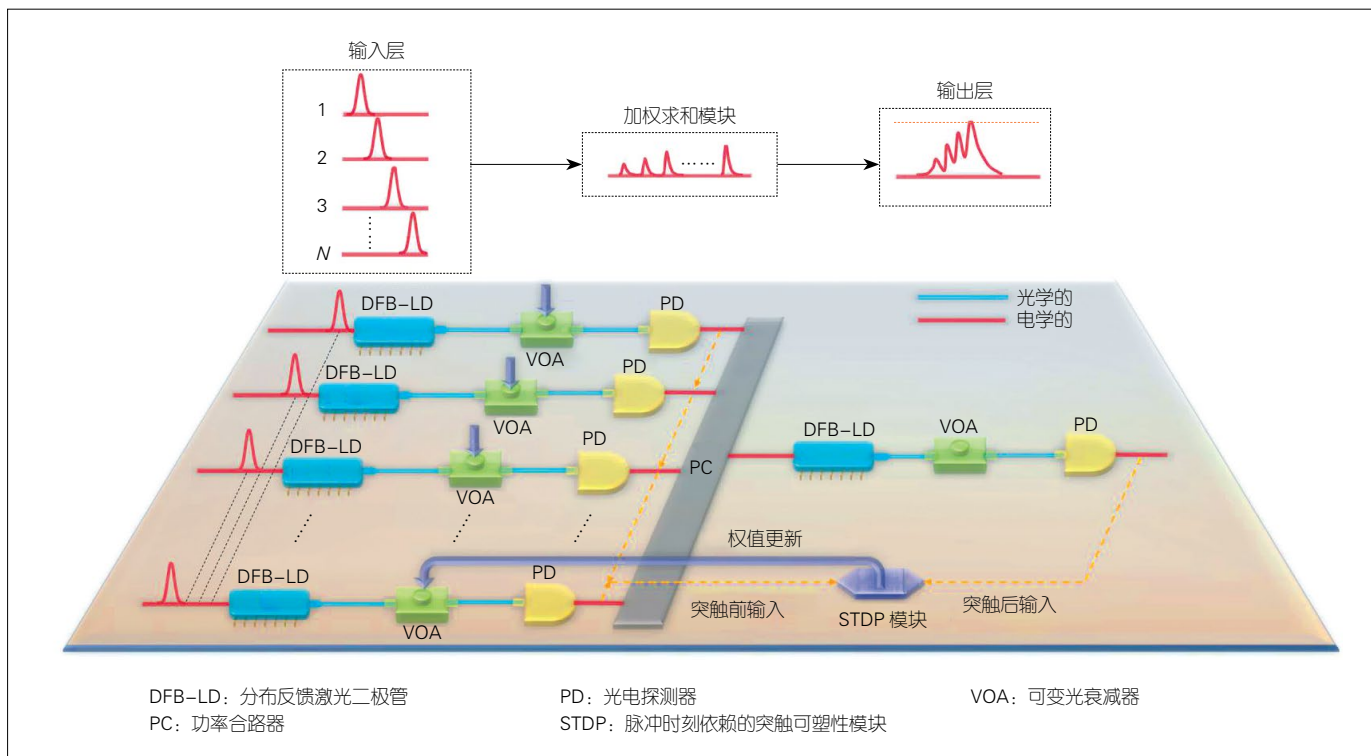
标模式并进行识别，且具有良好的集成潜力。

对于 OBNN，各种神经元和突触的高密度互连是 BNN 的显著特征，因此简洁而多样的光子神经元和突触将成为研究的重点。近期的研究聚焦于光子神经元或突触功能特性的论证，而很少关注其级联和扩展特性。当前基本单元的种类远远不够丰富，因此可用的计算性质还很匮乏。值得注意的是，OBNN 是实现神经拟态 IPS 的重要途径。

### 3 针对 IPS 的大规模混合集成技术

IPS 是一个复杂的光电混合系统，包括光学有源/无源器件和射频驱动单元。大规模的光电子集成技术为 IPS 实现低功耗和高速率的信息处理提供了支撑。集成化的 IPS 拥有更加丰富的处理单元库以及更强的处理能力，能够解决更复杂的任务。

按照集成器件是否使用多材料体



▲图7 基于DFB-LD的时空脉冲模式识别网络

系分类，光电集成可以分为单片同质集成与异质集成。在单片同质集成方面，A. H. ATABAKI 等首次提出了基于硅基材料构建光电集成芯片的方法<sup>[48]</sup>。J. S. FABNDINO 等提出了基于磷化铟材料的微波光子滤波器的集成方法<sup>[49]</sup>。另一方面，异质集成能够发挥各种材料的优势，提升各功能器件的性能。根据是否进行异质材料生长，异质集成可分为单片异质集成与混合异质集成<sup>[50]</sup>。WANG Z. C. 等通过外延生长在硅基衬底上成功制备了可以大规模集成的单片 III-V 族-硅基激光器<sup>[51]</sup>，在此基础上，WANG Y. 等制备了单片 III-V 族-硅基量子点激光器阵列<sup>[52]</sup>。混合集成的优势在于避免了不同材料间的晶格失配，工艺相对简单，但是集成度较低。N. LINDENMANN、P. O. WEIGEL、B. BEHROOZPOUR 等相继利用光子引线键合技术<sup>[53]</sup>、晶圆键合技术<sup>[54]</sup>、硅通孔技术<sup>[55]</sup>进行光互联与电互联实现光电混合集成。

相比于电子设备，光电集成技术为 IPS 提供了更高的能量效率和处理带宽，有效突破了目前的电学瓶颈。对于单片同质集成，较为成熟的材料体系为硅基材料和磷化铟材料。其中，硅基材料难以集成光源等有源器件，磷化铟材料成本较高，难以大规模集成。混合异质集成主要面临的是实现高效光耦合与电路-光路接口的封装问题和由驱动电路带来的散热问题。单片异质集成是实现光电一体的大规模集成的关键技术途径，其避免了混合集成带来的封装问题；但单片异质集成目前有 3 个问题：多材料的兼容

问题、由集成度提高带来的光路-电路的检测问题，以及芯片的散热问题。近年来，随着光电集成技术不断发展与探索，具有代表性的相关进展如表 1 所示。可以说，大规模光电集成技术的不断成熟，点亮了 IPS 的未来发展之路。

#### 4 结束语

文章中，我们首先介绍了开发 IPS 的必要性，随后阐述了 IPS 概念的不同架构，即 AI 赋能的 IPS、光子辅助 AI 的 IPS 和神经拟态的 IPS，并指出其在不同层次中的潜在优势。此外，

▼表1 大规模混合集成技术的相关进展

光电集成种类	参考文献	主要内容
单片单质	[48]	硅基集成 7 000 万晶体管和 850 个光子器件
单片单质	[49]	磷化铟基微波光子滤波器
单片异质	[51]	光泵浦 III-V 族-硅基激光器阵列
单片异质	[52]	电泵浦 III-V 族-硅基量子点激光器阵列
混合异质	[53]	利用光子引线键合技术的实现分立光芯片互联
混合异质	[54]	基于晶圆键合的硅基-铌酸锂光子集成器件
混合异质	[55]	基于硅通孔技术的混合集成系统



我们回顾了 IPS 架构设计和关键技术的研究进展, 最后对 IPS 未来的发展前景进行了展望。我们希望在研究人员努力下, IPS 能够不断成熟, 在未来智能化场景中发挥重要作用。下一步, 研究人员还应关注 BNN 的拓扑结构、学习方案和进化机制等内容, 作为实现神经拟态 IPS 的重要参考。

## 致谢

本文的部分研究成果和内容撰写得到了邹秀婷博士研究生和王静博士的帮助, 谨致谢意!

## 参考文献

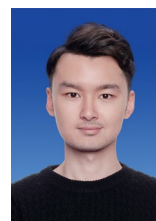
- [1] 李德仁. 5G 时代空间信息如何实现智能服务 [EB/OL]. (2019-09-30)[2020-01-30]. [http://kepu.gmw.cn/2019-09/30/content\\_33200461.htm](http://kepu.gmw.cn/2019-09/30/content_33200461.htm)
- [2] 6G Flagship, University of Oulu. Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence (white paper)[R]. 2019
- [3] CAPMANY J, NOVAK D. Microwave Photonics Combines Two Worlds[J]. Nature Photon, 2007, 1(6): 319-330. DOI: 10.1038/nphoton.2007.89
- [4] SUN C, WADE M, LEE Y, et al. Single-Chip Microprocessor that Communicates Directly Using Light[J]. Nature, 2015, 528(7583): 534-538. DOI: 10.1038/nature16454
- [5] SILVER D, HUANG A, MADDISON C, et al. Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search[J]. Nature, 2016, 529(7587): 484-489. DOI: 10.1038/nature16961
- [6] SILVER D, SCHRITTWIESER J, SIMONYAN K, et al. Mastering the Game of Go without Human Knowledge[J]. Nature, 2017, 550(7676): 354-359. DOI: 10.1038/nature24270
- [7] YANG G, ZOU W W, YU L, et al. Compensation of Multi-Channel Mismatches in High-Speed High-Resolution Photonic Analog-to-Digital Converter[J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24061-24074. DOI: 10.1364/OE.24.024061
- [8] MINZIONI P, ALBERTI F, SCHIFFINI A. Techniques for Nonlinearity Cancellation Into Embedded Links by Optical Phase Conjugation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(8): 2364-2370. DOI: 10.1109/JLT.2005.850806
- [9] WALDROP M M. The Chips are Down for Moore's Law[J]. Nature, 2016, 530(7589): 144-147. DOI: 10.1038/530144a
- [10] PARK S W, PARK J Y, BONG K, et al. An Energy-Efficient and Scalable Deep Learning/Inference Processor with Tetra-Parallel MIMD Architecture for Big Data Applications[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2015, 9(6): 838-848. DOI: 10.1109/TBCAS.2015.2504563
- [11] PRUCNAL P R, SHASTRI B J. Neuromorphic Photonics[M]. USA: CRC Press, 2017
- [12] DENEVE S, ALEMI A, BOURDOUKAN R. The Brain as an Efficient and Robust Adaptive Learner[J]. Neuron, 2017, 94(5): 969-977. DOI: 10.1016/j.neuron.2017.05.016
- [13] MAASS W, NATSCHLAGER T, MARKRAM H. Real-Time Computing Without Stable States: A New Framework for Neural Computation Based on Perturbations[J]. Neural Computation, 2002, 14(11): 2531-2560. DOI: 10.1162/089976602760407955
- [14] BARBASTATHIS G, OZCAN A, SITU G. On the Use of Deep Learning for Computational Imaging[J]. Optica, 2019, 6(8): 921-943. DOI: 10.1364/OPTICA.6.000921
- [15] RIVENSON Y, GOROCZ Z, GUNAYDIN H, et al. Deep Learning Microscopy[J]. Optica, 2017, 4(11): 1437-1443. DOI: 10.1364/OPTICA.4.001437
- [16] SINHA A, LEE J, LI S, et al. Lensless Computational Imaging Through Deep Learning[J]. Optica, 2017, 4(9): 1117-1125. DOI: 10.1364/OPTICA.4.001117
- [17] WU Y C, RIVENSON Y, ZHANG Y B, et al. Extended Depth-of-Field in Holographic Imaging Using Deep-Learning-Based Autofocusing and Phase Recovery[J]. Optica, 2018, 5(6): 704-710. DOI: 10.1364/OPTICA.5.000704
- [18] ZHANG X Y, CHEN Y F, NING K F, et al. Deep Learning Optical-Sectioning Method[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30762-30772. DOI: 10.1364/OE.26.030762
- [19] MANUFOLD B, THOMAS E, FRABCI S A T, et al. Denoising of Stimulated Raman Scattering Microscopy Images Via Deep Learning[J]. Biomed Optics Express, 2019, 10(8): 3860-3874. DOI: 10.1364/BOE.10.003860
- [20] WANG C X, FU S N, XIAO Z P, et al. Long Short-Term Memory Neural Network (LSTM-NN) Enabled Accurate Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR) Monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(16): 4140-4146. DOI: 10.1109/JLT.2019.2904263
- [21] FANG H Q, LU W, LI Q H Z, et al. Predictive Analytics Based Knowledge-Defined Orchestration in a Hybrid Optical/Electrical Datacenter Network Testbed[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(19): 4921-4934. DOI: 10.1109/JLT.2019.2925827
- [22] SUAREZ-VARELA J, MESTRES A, YU J L, et al. Routing in Optical Transport Networks with Deep Reinforcement Learning[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(11): 547-558. DOI: 10.1364/JOCN.11.000547
- [23] ZHANG J, XIA L, ZHU M Y, et al. Fast Remodeling for Nonlinear Distortion Mitigation Based on Transfer Learning[J]. Optics Letters, 2019, 44(17): 4243-4246. DOI: 10.1364/OL.44.004243
- [24] WANG D S, ZHANG M, LI J, et al. Intelligent Constellation Diagram Analyzer Using Convolutional Neural Network-Based Deep Learning[J]. Optics Letters, 2017, 25(15): 17150-17166. DOI: 10.1364/OE.25.017150
- [25] NISHIZAKI Y, VAKDUVIA M, HORISAKI R, et al. Deep Learning Wavefront Sensing[J]. Optics Express, 2019, 27(1): 240-251. DOI: 10.1364/OE.27.000240
- [26] SHILOH L, EVAL A, GIRVES R. Efficient Processing of Distributed Acoustic Sensing Data Using a Deep Learning Approach[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4755-4762. DOI: 10.1109/JLT.2019.2919713
- [27] HAMMOND A M, CAMACHO R M. Designing Integrated Photonic Devices Using Artificial Neural Networks[J]. Optics Express, 2019, 27(21): 29620-29638. DOI: 10.1364/OE.27.029620
- [28] MALKIEL I, MREJEN M, NAGKER A, et al. Plasmonic Nanostructure Design and Characterization Via Deep Learning[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 60. DOI: 10.1038/s41377-018-0060-7
- [29] LAPORTE F, DAMBRE J, BIENSTMAN P. Highly Parallel Simulation and Optimization of Photonic Circuits in Time and Frequency Domain Based on the Deep-Learning Framework PyTorch[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 5918. DOI: 10.1038/s41598-019-42408-2
- [30] ZAHAVY T, DIKOPOLTSSEV A, MOSS D, et al. Deep Learning Reconstruction of Ultrashort Pulses[J]. Optica, 2018, 5(5): 666. DOI: 10.1364/optica.5.000666
- [31] XU S F, ZOU X T, MA B W, et al. Deep-Learning-Powered Photonic Analog-to-Digital Conversion[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 66. DOI: 10.1038/s41377-019-0176-4
- [32] ZOU X T, XU S F, LI S J, et al. Optimization of the Brillouin Instantaneous Frequency Measurement Using Convolutional Neural Networks[J]. Optics Letters, 2019, 44(23): 5723. DOI: 10.1364/ol.44.005723
- [33] SHEN Y C, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep Learning with Coherent Nanophotonic Circuits[J]. Nature Photonics, 2017, 11(93): 441-447. DOI: 10.1038/nphoton.2017.93
- [34] LIN X, RIVENSON Y, YARDIMCI N T, et al. All-Optical Machine Learning Using Diffractive Deep Neural Networks[J]. Science, 2018, 361(6406): 1004-1008. DOI: 10.1126/science.aat8084
- [35] HAMERLY R, BERNSTEIN L, SLUDDS A, et al. Large-Scale Optical Neural Networks Based on Photoelectric Multiplication[J]. Physical Review X, 2019, 9(2): 021032. DOI: 10.1103/physrevx.9.021032
- [36] BANGARI V, MARQUEZ B A, MILLER H, et al. Digital Electronics and Analog Photonics For Convolutional Neural Networks (DEAP-CNNs)[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(1): 1-13. DOI: 10.1109/jstqe.2019.2945540
- [37] WILLIAMSON I A D, HUGHES T W, MINKOV M, et al. Reprogrammable Electro-Optic Nonlinear Activation Functions for Optical Neural Networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(1): 1-12. DOI: 10.1109/jstqe.2019.2930455
- [38] HUGHES T W, MINKOV M, SHI Y, et al. Training of Photonic Neural Networks through in Situ Backpropagation and Gradient Measurement[J]. Optica, 2018, 5(7): 864. DOI: 10.1364/optica.5.000864
- [39] XU S F, WANG J, WANG R, et al. High-accuracy Optical Convolution Unit Architecture for Convolutional Neural Networks by Cascaded Acousto-Optical Modulator Arrays[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19778. DOI: 10.1364/oe.27.019778

- [40] XU S F, WANG J, ZOU W W. High-Energy-Efficiency Integrated Photonic Convolutional Neural Networks[EB/OL]. [2020-01-30]. <https://arxiv.org/abs/1910.12635>
- [41] NAHMIAS M A, SHASTRI B J, TAIT A N, et al. A Leaky Integrate-and-Fire Laser Neuron for Ultrafast Cognitive Computing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(5): 1-12. DOI:10.1109/jstqe.2013.2257700
- [42] PRUCNAL P R, SHASTRI B J, FERREIRA DE LIMA T, et al. Recent Progress in Semiconductor Excitable Lasers for Photonic Spike Processing[J]. Advances in Optics and Photonics, 2016, 8(2): 228. DOI:10.1364/aop.8.000228
- [43] CHENG Z G, RÍOS C, PERNICE W H P, et al. On-Chip Photonic Synapse[J]. Science Advances, 2017, 3(9): e1700160. DOI:10.1126/sciadv.1700160
- [44] XIANG S Y, ZHANG Y H, GONG J K, et al. STDP-Based Unsupervised Spike Pattern Learning in a Photonic Spiking Neural Network with VCSELs and VCSOsAs[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(6): 1-9. DOI:10.1109/jstqe.2019.2911565
- [45] TAIT A N, NAHMIAS M A, SHASTRI B J, et al. Broadcast and Weight: An Integrated Network for Scalable Photonic Spike Processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(21): 4029-4041. DOI:10.1109/jlt.2014.2345652
- [46] FELDMANN J, YOUNGBLOOD N, WRIGHT C D, et al. All-Optical Spiking Neurosynaptic Networks with Self-Learning Capabilities[J]. Nature, 2019, 569(7755): 208-214. DOI:10.1038/s41586-019-1157-8
- [47] MA B W, CHEN J P, ZOU W W. A DFB-LD-based Photonic Neuromorphic Network for Spatiotemporal Pattern Recognition [C]//2020 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition (OFC). USA: Optical Society of America, 2020
- [48] ATABAKI A H, MOAZENI S, PAVANELLO F, et al. Integrating Photonics with Silicon Nanoelectronics for the Next Generation of Systems on a Chip[J]. Nature, 2018, 556(7701): 349-354. DOI:10.1038/s41586-018-0028-z
- [49] FANDIÑO J S, MUÑOZ P, DOMÉNECH D, et al. A Monolithic Integrated Photonic Microwave Filter[J]. Nature Photonics, 2017, 11(2): 124-129. DOI:10.1038/nphoton.2016.233
- [50] YOO S J B, GUAN B B, SCOTT R P. Heterogeneous 2D/3D Photonic Integrated Microsystems[J]. Microsystems & Nanoeengineering, 2016, 2: 16030. DOI:10.1038/micronano.2016.30
- [51] WANG Z C, TIAN B, PANTOUVAKI M, et al. Room-Temperature InP Distributed Feedback Laser Array Directly Grown on Silicon[J]. Nature Photonics, 2015, 9(12): 837-842. DOI:10.1038/nphoton.2015.199
- [52] WANG Y, CHEN S M, YU Y, et al. Monolithic Quantum-dot Distributed Feedback Laser Array on Silicon[J]. Optica, 2018, 5(5): 528. DOI:10.1364/optica.5.000528
- [53] LINDENMANN N, BALTHASAR G, HILLERKUS D, et al. Photonic Wire Bonding: A Novel Concept for Chip-Scale Interconnects[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17667. DOI:10.1364/oe.20.017667
- [54] WEIGEL P O, SAVANIER M, DEROSE C T, et al. Lightwave Circuits in Lithium Niobate through Hybrid Waveguides with Silicon Photonics[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 22301. DOI:10.1038/srep22301
- [55] BEHROOZPOUR B, SANDBORN P A M, QUACK N, et al. 11.8 Chip-Scale Electro-Optical 3D FMCW Lidar with 8  $\mu$ m Ranging Precision[C]//2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). USA: IEEE, 2016: 214-216. DOI:10.1109/isscc.2016.7417983

## 作者简介



邹卫文，上海交通大学教授、电子信息与电气工程学院副院长，国家“优青”获得者，军委科技委重点项目首席科学家，科技部重点研发项目负责人；主要从事智能微波光波融合技术研究；先后主持国家自然科学基金项目、科技部重点研发项目和国防项目等 10 余项，获上海市发明技术一等奖（排名第一）；授权中国发明专利 25 项、美国专利 5 项，发表 SCI 论文 90 余篇。



马博文，上海交通大学电子科学与技术专业在读博士研究生；主要从事类脑光子技术研究。



徐绍夫，上海交通大学电子科学与技术专业在读博士研究生；主要从事智能光子技术研究。

# 面向 6G 的可见光通信

## Visible Light Communication Towards 6G



迟楠 /CHI Nan, 贾俊连 /JIA Junlian

(复旦大学, 上海 200433)  
(Fudan University, Shanghai 200433, China)

**摘要:** 无线通信中的频段资源已经十分紧张, 在 6G 复杂的通信环境下, 传统的无线通信也难以达到全面的高速覆盖。可见光通信作为一种利用 400 ~ 800 THz 无须授权频段的高速通信技术, 将在 6G 网络中担任重要的角色。从器件、速率、特殊场景应用、异构组网和高速光互联 5 个方面讨论了可见光通信的进展, 并介绍了现阶段面临的挑战和对未来的展望。

**关键词:** 可见光通信; 6G; 光互联

**Abstract:** Frequency band resources in wireless communication are already very tight, and it is difficult for traditional wireless communication to reach full high-speed coverage in 6G complex communication environment. Visible light communication (VLC), as a high-speed communication technique taking advantage of unlicensed spectrum of 400–800 THz, will take an important role in 6G. In this paper, the recent research in VLC including devices, rate, special scene applications, heterogeneous networking and high-speed optical interconnection is discussed, as well as the challenges and the prospects.

**Keywords:** visible light communication; 6G; optical interconnection

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200423.1354.002.html>

网络出版日期: 2020-04-23

收稿日期: 2020-02-18

**截**至 2019 年年底, 5G 已经开始商用部署, 各个国家的机构也逐步开始了 6G 的研究。早在 2018 年 7 月, 国际电信联盟就针对 2030 年及之后的通信系统技术发展, 成立了一个焦点小组。相比于现有的 5G 网络, 6G 网络能提供更好的性能, 以满足如工业 4.0、个人健康服务、虚拟出席等

新兴且极具挑战性的应用要求; 因此, 6G 的目标速度应该比 5G 快 1 000 倍。从 2G 开始, 一直到 4G, 一共有大约 6 GHz 带宽的频谱资源已被占用。5G 通过整合 24 ~ 100 GHz 的频谱资源, 尽可能地提升了频谱利用的效率<sup>[1]</sup>。而如今, 研究者们发现目前的频谱资源已经逐渐满足不了飞速增长的带宽需求; 因此, 在 6G 的研究中, 探索如何能够进一步扩展 100 GHz 以上的频谱资源, 如何能够寻得不同的频谱来源显得极为重要。

此外, 不仅仅满足于现有的“城市、车联网、物联网”的 5G 覆盖范围, 6G 的覆盖范围将进一步扩充至偏远地区、水面、水下、空中乃至卫星中, 成为一个空天地一体化的网络<sup>[2]</sup>, 其概念图如图 1 所示。但这些场景的环境差异巨大, 这意味着 6G 网络将不再是一个使用单一通信手段的通信网络, 只有融合各种无线通信方法, 发挥其各自优势, 才能够实现一个一体化的网络。

可见光通信作为一种频谱无须授

**基金项目:** 科技部重点研发计划“高速可见光通信技术研究和芯片化设计”(2017YFB0403603)、国家自然科学基金(61925104)

权的高速率通信方式,是常规无线局域网的一个很好的替代品。在室内环境中,可见光通信有其独特的优势,可以实现高保密、人体无害、无电磁辐射的高速通信,能够覆盖人们近 80% 的活动范围。可见光通信在室外地面通信中也有很好的应用场景,如车间通信很可能成为首个实现可见光通信的场景<sup>[3]</sup>。可见光通信利用了从 400 ~ 800 THz 的超宽频谱,在图 1 所示的 6G 网络场景中,可以用于实现大气内外、水面水下等场景中的同环境设备之间以及不同环境设备间的通信。

本文中,我们主要针对 6G 中可见光通信的应用,从器件、速率、组网和一些新的应用方面来介绍可见光通信的研究进展和挑战,并展望了可见光通信在未来的研究。

## 1 可见光通信中的器件

可见光通信的基础是点对点系统<sup>[4]</sup>,多输入多输出(MIMO)的可见光通信系统也在随着系统容量的增加而逐渐发展<sup>[5]</sup>。一个典型的可见光通信分为发射和接收两个部分<sup>[6]</sup>,而这两部分的关键器件在于发射部分中的电光转换器件、接收部分中的光电转换器件。其中,发射器件主要分为发光二极管(LED)、激光二极管(LD)和最新研发的超辐射二极管(SLD),接收器件主要分为光电二极管(PIN)、雪崩二极管(APD)、图像传感器,以及一些特殊应用场景下的特种接收器,如日盲型光电探测器(日盲 PD)和单光子探测器(SPAD)等。作为可见光通信系统的主要性能瓶颈,这些器件的发展极大地制约了可见光通信的发展。

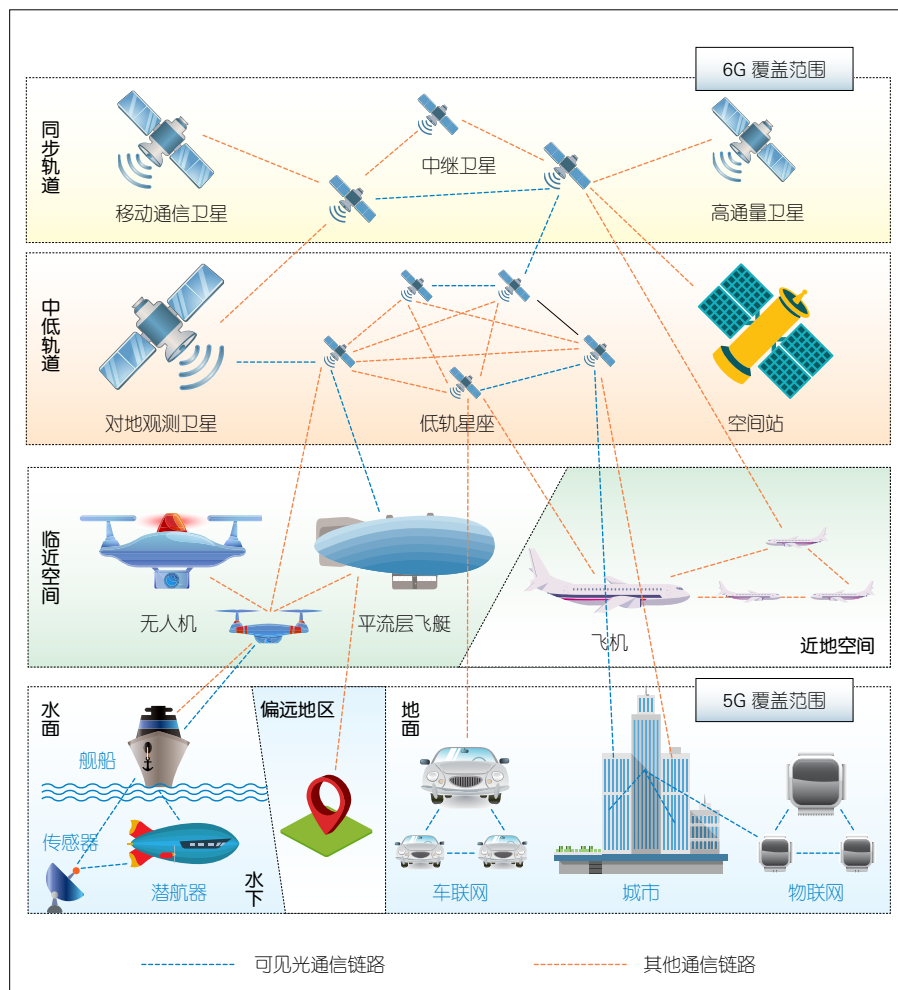
### 1.1 可见光通信系统中的发射器件

上述 3 种发光器件的主要参数对比如表 1 所示。LED 和 LD 为目前最

常见的两种发光器件<sup>[7-8]</sup>,而 SLD 是一种介于 LED 和 LD 之间的发光器件。SLD 不仅结合了 LD 的光束方向性与 LED 大发散度的优点,还具有大带宽、高亮度和无斑点的优点。一种基于 InGaN 的高功率蓝光 SLD 首先在 2016 年被提出,它拥有 800 MHz 的极高带宽。随着制造工艺逐步成熟,SLD 将成为一种极有前途的可见光通信发光器件。

最常见的 LED 为通过蓝光 LED

激发黄色荧光粉而产生白光的白色 LED、通过紫外 LED 激发红绿蓝(RGB)荧光粉产生白光的白色 LED,以及集成了红绿蓝 3 色 LED 的 RGB LED。最近的研究表明,等离子体 LED<sup>[9]</sup>和微 LED( $\mu$ LED)<sup>[10]</sup>拥有比普通 LED 更高的带宽,因而也被应用到可见光通信系统中。复旦大学与丹麦技术大学合作的表面等离子体 LED,通过表面等离子体增大了载流子的自发发射速率,将 LED 的带宽提



▲ 图 1 6G 空天地一体化概念图

▼ 表 1 可见光通信中的发射器件对比

器件类型	辐射方式	存在光效下降现象	-3 dB 带宽
LED	自发辐射	是	< 100 MHz
LD	受激辐射	否	吉赫兹量级
SLD	放大的自发辐射	否	400 ~ 800 MHz

LD: 激光二极管

LED: 发光二极管

SLD: 超辐射二极管



升至 201.13 MHz<sup>[9]</sup>。中山大学与复旦大学合作的  $\mu$ LED 阵列, 像素大小为 30 ~ 60  $\mu\text{m}$  不等, 无须预均衡即可达到 600 MHz 的带宽, 实现了单通道 3 Gbit/s 的高速传输<sup>[10]</sup>。

此外, 硅基 LED (Si-LED) 因其抗静电能力强、寿命长以及生产效率高<sup>[11]</sup>等特点, 也逐渐在可见光通信中被大量使用。复旦大学与南昌大学合作的 Si-LED 使用基于表面纹理化的 GaN, 提高了发光效率, 并配合 Ag 反射层和互补电极, 降低了硅表面和电极对光线的吸收, 改善了垂直 LED 单面发光的发光性能。复旦大学研究团队使用该 LED, 实现了水下 1.2 m、15.17 Gbit/s 的高速传输<sup>[11]</sup>。

使用成品 LED 也是可见光通信系统的一个选择, 英国爱丁堡大学使用了价格低于 50 美分的成品 LED, 并在 1.6 m 的自由空间中创下了 15.73 Gbit/s 的可见光通信速率记录<sup>[12]</sup>。

## 1.2 可见光通信系统中的接收器件

在可见光通信系统的接收器件中, PIN 和 APD 是当前主流的接收器。一般地, 在高速可见光通信中使用 PIN, 因为 PIN 拥有高至 1 Gbit/s 的接收速率, 且其成本与 APD 相比较低。APD 主要用于需要更高接收灵敏度的场景中。为了进一步提升 PIN 的灵敏度, 复旦大学提出了一个集成的  $3 \times 3$  的 PIN 阵列, 单个 PIN 的大小为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 带宽为 25 MHz, 集成阵列的总大小小于  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ <sup>[13]</sup>。使用该 PIN 阵列可以实现 1.2 Gbit/s 的可见光通信, 并且极大地增加了接收端的视场角<sup>[14]</sup>。

太阳背景光是可见光通信系统的一大噪声干扰源, 过强的环境光会造成接收器饱和, 以至于失去接收信号的能力。基于 AlGaIn 的日盲 PD 便是针对强太阳光场景的接收器件, 因其

仅对太阳光中所不覆盖的一部分紫外波段敏感, 不会受到太阳光的影响。2005 年, 土耳其毕尔肯大学使用 AlGaIn 肖特基二极管作为日盲 PD, 在日盲区可达 0.147 A/W 的响应度<sup>[15]</sup>。2015 年, 日本东京大学研发出一种具有金属-半导体-金属 (MSM) 结构的钙钛矿日盲 PD, 响应度增至 7.85 A/W<sup>[16]</sup>。然而, 日盲 PD 作为通信接收器的瞬态响应和稳定性仍待进一步研究, 其在通信中的应用实现方法也十分缺乏。

针对灵敏度要求极高的特殊应用场景, 如水下长距离可见光通信, 单光子检测技术因其具有超高的灵敏度而被广泛研究。2002 年, A. A. VEREVKIN 等研发出一种基于氮化铌 (NbN) 的超薄膜超导单光子检测器 (SSPD)。该检测器对 405 nm 波长的光有约 10% 的量子效率, 并可达 10 GHz 的光子计数频率<sup>[17]</sup>。2015—2017 年, 美国国家标准与计数研究院 (NIST) 研发了针对红外波段和紫外波段的硅化钼 (MoSi) 超导纳米线单光子探测器 (SNSPD)<sup>[18-19]</sup>。SSPD 和 SNSPD 相比于传统的技术, 具有高检测效率、低暗计数和低定时抖动的优势; 但对于复杂度极高的冷却技术的需求是其在应用中的一大缺陷。

聚焦用的光学元件在可见光通信系统中也是重要的一环。通过对接收到的光线进行聚焦, 可以提升接收信号的信噪比, 从而提高传输速率; 然而, 这种信噪比的增加是以视场角的降低为代价的。因此, 复旦大学提出了一款使用柔性纳米材料的非成像光学聚焦器, 将可见光转换为接收器更敏感的红外光, 提高了接收器的灵活性, 实现自由空间 0.5 m、400 Mbit/s 的可见光通信, 速率提升了 60%<sup>[20]</sup>。进一步地, 通过在杂化聚合物的基底上添加一个一维二元布拉格光栅, 复旦大学实现了带宽 125 MHz、速率 250 Mbit/s 的可

见光通信, 速率提升了 67%<sup>[21]</sup>。

目前的可见光通信仍主要面临 LED 的带宽限制、探测器的灵敏度低以及系统中的非线性问题, 而面向 6G 的可见光通信要求将更高。未来的高速可见光通信系统需要基于新材料的新的光电、电光器件。新的光源应具有更宽的调制带宽和更高的光效率, 而新的探测器应具有更优的可见光波段的灵敏度以及内部和外部的量子效率。可见光通信的进一步发展中还引入更多先进的光电子设备, 如外调制器、光放大器、光开关、多路复用器及解复用器等。

## 2 高速可见光通信系统

相比于传统的无线通信, 传输速率高是可见光通信的一大优势, 也是面向 6G 的可见光通信的一大特点; 因此, 研究人员将很大的精力放在了提升可见光通信系统的速率上。高速可见光通信系统可以分为两种: 离线系统和实时系统。离线系统使用示波器或其他数据采集设备记录接收到的信号, 之后使用离线程序对数据进行处理; 而在实时系统中, 接收到的信号会被实时地进行处理、解算为实际传输的数据。在实验室中, 研究人员通常搭建离线系统来进行新的技术研究。

### 2.1 可见光通信中的先进调制技术

受制于 LED 的带宽限制, 高速可见光通信系统中的关键问题之一就是如何实现高频谱效率的高速传输。光电场的表达式如公式 (1) 所示:

$$\mathbf{E}(t) = \sqrt{P(t)} \cos[\omega_0(t)t - \phi(t)] \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (1)$$

其中,  $\sqrt{P(t)}$  表示信号的幅度,  $\omega_0(t)$  表示信号的频率,  $\phi(t)$  表示信号的相位,  $\hat{\mathbf{x}}(t)$  表示信号偏振态。这 4 个维度共同

表征了光电场的信号,而对于每一个维度,我们都可以对其进行调制。典型的调制方式如表 2 所示。如果同时对两个或两个以上的维度组合在一起进行调制,则可以进一步地增加系统容量。

同时,随着可见光通信系统的不断发展和完善,系统的信噪比已得到了显著提升。高阶调制的运用可以进一步增加系统的容量。如图 2 所示,从开关键控法(OOK)调制一直到高阶的正交振幅调制(QAM)调制,虽然系统的噪声容限逐步下降,但每个符号所携带的信息量逐步增加,系统的传输速率自然也随之增加。在信噪比允许的情况下,利用高阶的调制方式可以进一步增加频谱效率。

另外,在可见光通信常规的波分

复用方式中,为保证信号质量,各个子带之间的间隔频率一般大于各子带的带宽,子带之间存在保护间隔。这样做可以减小子带间串扰和码间干扰,但并没有充分利用频谱资源。图 3 展示了如何减少子带间隔来提高频谱效率。在奈奎斯特系统中,子带之间的间隔频率与子带带宽相等,在提高了频谱效率的同时没有引入更多的子带间串扰和码间干扰。在超奈奎斯特中,子带间隔小于子带带宽,这进一步提高了频谱利用效率;但引入了子带间的串扰和码间干扰,需要使用如多符号判决等先进的数字信号处理技术来进行接收端的处理。

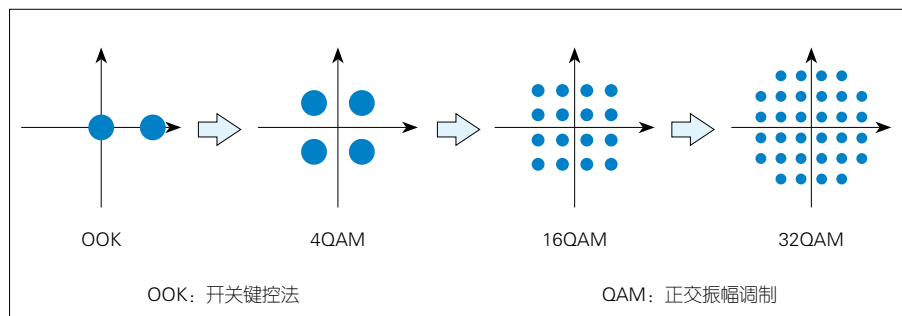
因此,提升可见光通信系统中的通信速率主要有 3 个方向:从一维调制增加到多维调制,从二电平调制到

多电平调制,以及从奈奎斯特调制到超奈奎斯特调制。近年来,可见光通信也逐步开始使用诸如概率整形(PS)、几何整形(GS)和极化码(PC)等新技术,进一步地减少频谱资源的浪费。

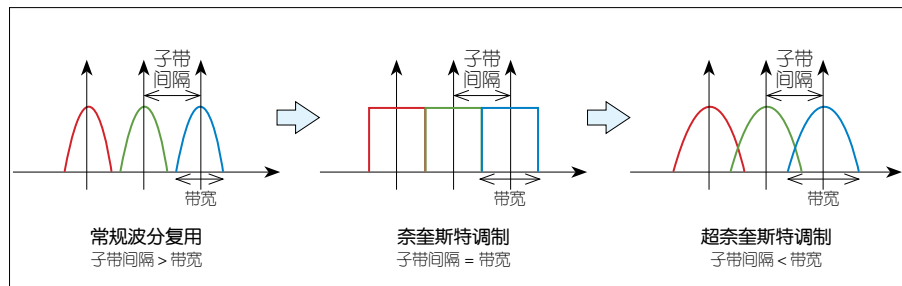
研究者们通过各种先进的调制技术,不断地提升了可见光通信系统的频谱利用效率。2015 年, HUANG X. X. 等研究应用比特加载的正交频分复用技术(OFDM),使用单个白色磷光 LED 实现了带宽为 600 MHz、速率为 2.28 Gbit/s 的 1.5 m 自由空间可见光通信传输<sup>[22]</sup>。2016 年, WANG Y. 等首次将超奈奎斯特技术引入可见光通信,使用分数阶傅里叶变换,提升了可见光通信系统中有限的带宽频谱利用效率<sup>[23]</sup>。进一步地,2017 年, ZHANG M. J. 等研究并应用了奈奎斯特的脉冲幅度调制(PAM8),在 RGB LED 上实现了 4.05 Gbit/s 的可见光通信传输,验证了奈奎斯特技术可以提高频谱利用率;但会带来严重的码间干扰<sup>[24]</sup>。同年, CHI N. 等研究应用超奈奎斯特的无载波相幅调制(CAP),使用单个红光 LED 实现了带宽为 350 MHz、速率为 1.47 Gbit/s 的 1.5 m 自由空间可见光通信传输,节省了 20% 的带宽需求<sup>[25]</sup>。

▼表 2 针对各维度的典型调制方式

幅度调制	频率调制	相位调制	偏振调制
OOK	FSK	DPSK	PolSK
QAM	MSK	QPSK	OAM
DPSK: 差分相移键控 FSK: 数字频率调制 MSK: 最小频移键控	OAM: 轨道角动量 OOK: 开关键控法 PolSK: 偏振移位键控	QAM: 正交振幅调制 QPSK: 正交相移键控	



▲图 2 高阶调制



▲图 3 高频谱效率调制

件均衡。其中,硬件均衡技术因电路参数固定,难以根据实际情况进行动态调整,而软件均衡技术则更为自由。

HUANG X. X. 等使用了级联的硬件预均衡,提升了可用带宽,在单个白色磷光 LED 实现了 1.6 Gbit/s 的可见光通信<sup>[26]</sup>。ZHOU Y. J. 等考虑了 LED 和 PIN 存在饱和的问题,比较了 3 种软件预均衡曲线在不同参数下的表现,实现了单个白光 LED 在自由空间 1 m 距离下 2.32 Gbit/s 的可见光通信的传输<sup>[27]</sup>。针对后均衡技术,WANG Y. G. 等使用了线性均衡器、基于 Volterra 级数的非线性均衡器,以及 DD-LMS 均衡器混合级联,将原本只有 25 MHz 的 LED 带宽提升至 320 MHz,在 RGBY LED 上实现了 8 Gbit/s 的高速传输<sup>[28]</sup>。ZHU X. 等结合硬件预均衡技术和软件后均衡技术,在 RGBYC 五色硅基 LED 上实现了 1.2 m 自由空间中总速

率为 10.72 Gbit/s 的可见光通信传输,创下了当时 LED 可见光通信速率的世界最高纪录<sup>[29]</sup>。

### 2.3 实时可见光通信系统

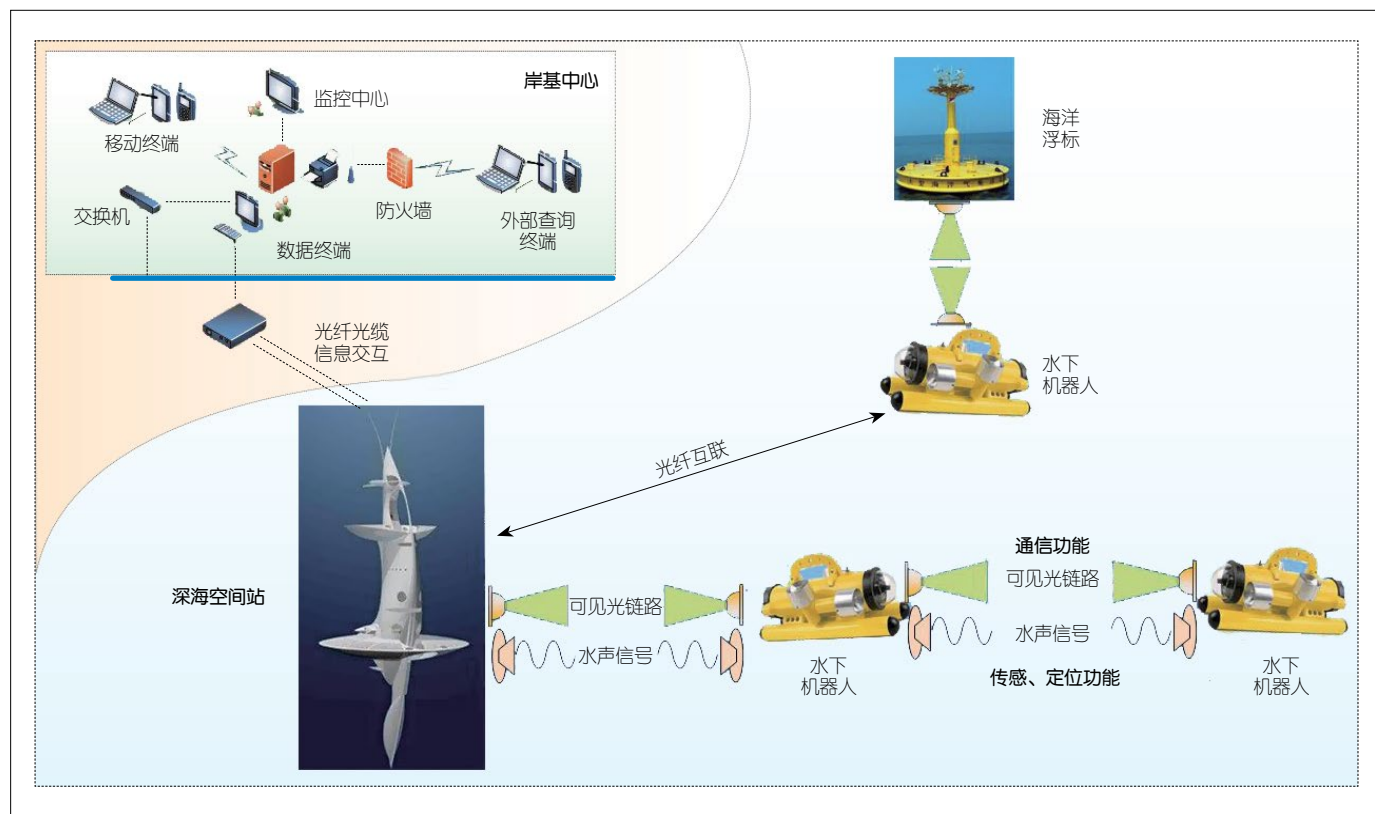
实时的可见光通信系统能够对海量的收发数据进行实时处理,这对于未来 6G 可见光通信的商业应用至关重要;因此,实时系统的研究也十分重要。2018 年,业界报道了一种基于不归零开关键控调制(NRZ-OOK)的自由空间 1.5 m 下 1 Gbit/s 的实时可见光通信系统。在 2019 年,复旦大学与华为公司合作,使用离散多音频调制(DMT)技术的  $2 \times 2$  MIMO 系统实现了自由空间 1.7 m 下 5 Gbit/s 的实时可见光通信。这也是迄今为止,单颗 LED 实时可见光通信系统速率的世界最高纪录<sup>[30]</sup>。

高速可见光通信技术不仅在器件

材料上至关重要,在先进的调制技术以及数字信号处理方面也充满挑战。如何提升系统带宽,如何在有限的系统带宽下进一步提升系统容量,不断地逼近容量的极限,是面向 6G 的高速可见光通信的核心问题,也是一个极大的挑战。

## 3 水下可见光通信技术

在图 1 所示的空天地一体化网络中,水下通信是不可或缺的一部分。海洋中的各类设备之间的超高速非接触式数据通信,以及水面至水下设备之间的数据链路均需要水下通信技术的支持,如图 4 所示。除了无线光通信之外,水下无线通信目前主要的手段包括声波和射频电波。声波是目前实现水下无线通信最常见的方法,由于声波在海水中衰减较小,可以实现极长距离的水下无线数据传输;然而,因声波带宽窄、



▲图 4 水下通信场景图



载频低且方向性差，它有着速率低、延迟大、安全性差的劣势。射频电波在水中的传输虽能实现比声波高的传输速率，但因海水作为导体而存在的趋肤效应，在海水中射频电波的衰减十分巨大，传输距离非常有限，所需的发射功率也很高。由此可见，这两种方式都无法满足 6G 中水下通信的需求。而波长在 450 ~ 550 nm 的蓝绿色可见光在水中的衰减远小于其他波段的衰减，这为水下可见光通信的发展奠定了天然的基础。与上述两种方法相比，水下可见光通信有着成本低、速率高、抗干扰强、安全性高等优点，成为了水下无线通信国际竞争的焦点。

目前，水下的可见光通信主要使用 LD 和 LED 实现。相比于 LED，LD 可以实现更长的传输距离和传输速率，但对于对准的要求十分苛刻。2018 年，FEI C. 等基于比特和功率加载的 DMT 技术，使用 450 nm 激光在水下实现了 1.7 m、14.8 Gbit/s 的通信<sup>[31]</sup>。LI C.Y. 等使用包含了 3 个 LD 的垂直腔面发射激光器（VECSEL）在浑水中实现了 5 m 距离下 25 Gbit/s 的通信<sup>[32]</sup>。

基于 LED 的水下可见光通信也在飞速发展。2019 年，复旦大学 LI J. H. 等使用 2×2 的 PIN 阵列扩大 LED 水下可见光通信的接收范围，利用单一蓝色 LED 实现了水下 1.2 m、1.8 Gbit/s 的通信<sup>[33]</sup>。同年，复旦大学 HU F. C. 等基于波分复用技术实现水下 20.09 Gbit/s 的 LED 可见光通信传输，刷新了水下 LED 可见光通信离线系统的最高速率记录<sup>[34]</sup>。随后，CHEN M. 等实现了水下 2.34 Gbit/s 的实时水下 LED 可将光通信系统，这也是目前实时水下 LED 可见光通信的最高速率<sup>[35]</sup>。

随着研究人员的不断探索，水下可见光通信的距离和速率不断增加；但在实际自然环境中，恶劣的水体环境会对通信造成极大的影响，散射、

湍流和吸收是 3 大主要影响因素。对水下可见光通信信道模型的建立仍然是一个十分关键的问题。2019 年，E. ZEDINI 等提出了一个首次能够描述淡水与咸水中气泡、湍流以及温差梯度导致水下可见光信道变化的模型<sup>[36]</sup>。然而，水下可见光信道的建模仍不完善，需要进一步的研究和发展。复旦大学 2018 年首次将机器学习应用在水下可见光通信的信道建模中，提出利用高斯核辅助的深度神经网络建立信道损伤模型<sup>[37]</sup>，并于 2019 年提出双支异构神经网络实现了水下可见光信道模拟器<sup>[38]</sup>。这些模型均经过实验得到了完美的验证，为水下可见光通信信道建模开辟了新的重要研究方向。

#### 4 可见光通信的异构和组网技术

在面向 6G 的实际应用中，可见光通信的组网技术需更深一步的研究，以满足 6G 中多用户以及混合架构等场景的需求。例如，多址接入和全双工的实现问题，如何实现接入灵活、服务质量高、用户体验好的低复杂度系统；网络价格的设计问题，如何设计基本网元结构和网络拓扑结构；接入点的布设问题，如何在房间内分配接入点数量，同时不会大幅度增加系统的复杂度；上行链路的设计问题，如何通过红外或其他无线方式实现上行链路，提高用户体验，减少干扰等等。

可见光通信与无线通信和光纤通信中现有的业务整合也是目前研究的一个热点方向。2014 年，WANG Y. Q. 等实现了可见光通信与被动光网络（PON）的整合，实现了自由空间中 30 cm、500 Mbit/s 的可见光通信与 40 km、10 Gbit/s 的 PON 结合的异构通信<sup>[39]</sup>。该团队同年亦针对多用户的可见光无线接入开展了研究，提出了一个以光纤作为网络骨干、星型拓扑的可见光通信接入网<sup>[40]</sup>。2018 年，

SHI J. Y. 等将基于红光 LED 的可见光通信信号耦合到直径为 1 mm 的特种光纤中，从而实现了 5 m 光纤中速率为 3.1 Gbit/s、100 m 光纤中速率为 2 Gbit/s 的可见光通信<sup>[41]</sup>。

在水下的可见光通信组网技术中，目前大多数的研究主要集中在物理层，缺少从系统级路由协议出发，设计具有扩展边界和高用户容量系统的相关研究。这些研究对于水下可见光通信组网系统的鲁棒性和可靠性具有着重要的作用。目前现有的研究主要基于陆地无线通信蜂窝网络结构，着重考虑海水的强衰减效应以及环境对于通信链路的影响。受限于水下的特殊环境，为了适应不同数据速率和通信距离的多节点网络构建，可见光通信与水声通信结合的声光混合网络得到了学术界和产业界的关注。对于各个节点来说，可见光通信具备高数据速率和低延迟的优点，而水声通信可以补齐长通信距离和鲁棒性的系统短板。L. J. JOHNSON 等的研究表明，使用声光混合网络模型的最大数据速率相较于传统水声链路扩大了 150 倍<sup>[42]</sup>。水下声光通信的异构组网为系统提供了一定的自由度，可以根据负载和水质情况选择最佳的传输方法。

未来的 6G 通信将是一个使用各种通信手段的全频谱网络，从网络中心、小区，一直到接入点和用户，不同的通信方式将担任不同的职责。面向 6G 的可见光通信需要有能力能力和如空间激光通信、毫米波太赫兹通信、微波无线通信和水声通信等技术兼容并共存，这将是 6G 中研究的一个重点内容。

#### 5 可见光芯片高速光互联

6G 通信网络的超高数据传输速率和超高数据吞吐量，将对作为网络服务基础的数据中心的容量和速率提出新的挑战。传统的数据中心中，信息



通过老式的铜线进行传输,不仅数据吞吐量受限,而且能耗巨大,远远无法满足爆炸式的数据传输量增长。光作为一种新型的高速信息传播载体,为信息传播的性能带来了历史性的跨越。目前,大规模数据中心的光互联传输普遍采用的还是基于小型可插拔(SFP)标准的 10 Gbit/s 直接调制直接检测方案,40 Gbit/s 的光互联则需要 4 路 10 Gbit/s 链路共同实现。然而,目前 40 Gbit/s 已经不足以满足数据中心对于带宽的要求。针对未来更为高速的 100 Gbit/s 光互联链路,各个光器件、芯片设备厂商已经加大了研发力度,但在标准与技术上还没有特定的具体方案。

现有高速数据链路发展的瓶颈主要在于大量光纤的使用带来的巨大成本。大量的光线连接及其配套的发射接收设备不仅增加了建设成本,同时也大大增加了能源消耗,包括设备自身运行以及空调散热所需的能量;因此,既要实现超高速、超大容量的数据连接,又要实现绿色节能环保,那么如何提高单根光纤的数据容量,减少光纤连接数量,同时降低系统的能源消耗,成为了 6G 时代需要面临的一大挑战。

数据中心核心的高性能处理器芯片是设备能耗和发热的主要部分。在主频逐渐提高、芯片面积逐渐扩大的情况下,芯片内电互联所固有的带宽小、延时大、互联密度低、串扰大、功耗高等缺点已成为高速芯片性能进一步提高的瓶颈。芯片内的光互联,即使用光链路代替电链路实现芯片内部的高速信号传输,是一种具有带宽高、延时小、功耗低等诸多电互联不可比拟的、有点的新兴互联方式。在未来,芯片内的光互联将是高性能处理器芯片中替代电互联的普遍选择。

世界上一些主要发达国家启动了相关计划开展片内光互联的研究,如

美国 DARPA 的“硅基光电集成回路”项目、欧盟的“硅异质结发射器”项目等。一些计算机领域的超级企业也启动了相应的研究计划,如美国英特尔公司的“Teraflop Research Chip”项目、美国太阳微系统公司的“Super-Computer on a Chip”项目等。这些项目的研究热点主要集中在硅基光器件、片内光互联网络结构、节点路由交换、调制、复用、器件兼容等方面。

在硅基电光调制器的研究方面,美国英特尔公司和美国康奈尔大学研制出了调制速率 20 Gbit/s 以上的电光调制器。在复用/解复用器的研究方面,加拿大北电网络、IBM 和美国麻省理工大学、美国太阳微系统公司等研制出了 4 信道复用/解复用器,美国 Luxtera 公司和新加坡微电子所研制出了 8 信道复用/解复用器。在节点路由交换器件的研究方面,美国康奈尔大学和美国耶鲁大学实现了 4 端口的节点路由交换器件。在光互联网络结构的研究方面,除二维 Mesh 网络以外,美国亚利桑那大学 2009 年提出了用于分布和并行计算机系统的  $N$  维可重构全光互联结构,美国太阳微系统公司同年提出了用于片上超级计算机的光互联网络结构。

中国在硅光子集成领域的研究虽起步稍晚,但发展迅速。中科院半导体所和中科院上海微系统研究所分别研制出了调制速率为 10 Gbit/s 的电光调制器,中科院半导体所研制出了信道间隔为 100 GHz 的 4 信道复用/解复用器,北京大学和浙江大学在电光调制器、偏振分束器和偏振旋转器方面做出了很好的研究工作,中科院计算所和国防科技大学在光互联网络结构具有很强的研究基础,上海交通大学和吉林大学在硅光子集成方面也具有很强的研究基础。可以说,中国在硅基光互联的部分研究已与国际

高水平团队并跑。

## 6 可见光通信面向 6G 的挑战与展望

在过去的十几年间,可见光通信经历了一个飞速发展的时期。可见光通信作为一种新型的通信技术,吸引了全世界大量的研究人员,取得了可喜的进展。除了室内的短距离高速通信,可见光通信技术还可以应用于从低速、高速到超高速的各种距离下的应用,如低速的室内定位、车联网、船联网,高速的医疗通信、高安全性通信、专网通信以及深空通信,超高速的室内超高速接入网等。与其他通信手段相结合,可见光通信将是未来 6G 蓝图中十分重要的组成部分。相应地,有关可见光通信的研究还需要深入发展。目前,6G 中可见光通信实现集成化商用的挑战主要有如下 5 个方面:

(1) LED 器件的带宽十分有限。带宽极大地制约了系统的传输速率。在未来,应该更多地针对可见光通信的应用需求,研究使用新材料和利用新机制的超高带宽光源器件。

(2) 硅基光探测器在可见光波段灵敏度远低于红外波段。接收器的灵敏度直接影响了接收信号的信噪比。使用基于 AlGaAs 的探测器,以及具有极高光电转换效率的单光子探测器将可能成为针对这一问题的解决方案。

(3) 缺少针对可见光通信基带信号处理的专用集成电路(ASIC)。可见光通信系统的小型化离不开 ASIC 的支持。ASIC 集成了包括驱动芯片、跨阻放大器(TIA)的模拟前端(AFE)以及基带数字信号处理在内的三部分功能。

(4) 可见光通信的主要结构仍为单点对单点。为了进一步提高系统容量、增加用户数量,基于发射器阵

列和接收器阵列的 MIMO 通信系统将是未来可见光通信的趋势。

(5) 收发光学天线体积过大。目前常用的光学天线仍为较大的透镜组,这也极大地影响了可见光通信系统集成化的进展。菲涅尔透镜和基于纳米光学天线的波束控制将可能用于解决这一问题。

此外,可见光通信系统的整体建模还亟待进一步深入的研究。当前的可见光通信信道模型仅基于 LED 或 LD 器件的光场分布和空间特性;但实际的可见光通信信道远比这些模型复杂,还包括了接收器的频率响应特性、光学天线参数、空间光场分布、湍流、背景光噪声、散射、衍射和反射等等。对可见光通信信道建模将能够有效地指导可见光通信理论研究,为未来 6G 中的高速空间通信和水下通信打下基础。

可见光通信作为一种高速可靠的无线通信方法,将与 6G 中的其他技术融合形成异构网络,共同提供大容量、高速率、稳定可靠的传输。在这样的一个网络中,每个接入点可以支持以超过 10 ms 的切换时间持续地服务多个终端,上行链路速率可以超过 10 Gbit/s,点对点的下行数据链路可以达到 100 ~ 200 Gbit/s。可见光通信为了能够适应未来 6G 系统中的复杂数据场景,亦应引入机器学习与人工智能算法,并成为下一阶段研究的重点。

## 7 结束语

本文中,结合目前可见光通信在器件、高速、组网和水下的最新研究进展,我们介绍了面向 6G 的可见光通信的发展、未来挑战和展望。研究人员已经在可见光通信领域中取得一系列令人瞩目的成果;但从专用的器件、光学天线的研究,一直到信道模型、异构网络架构的设计,该领域仍

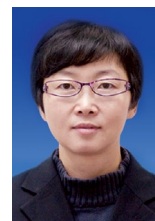
有许多严峻的挑战。机器学习在可见光通信中的应用尚不深入,智能化可见光通信系统的实现还需要更多的机器学习算法的研究。通过各方面有针对性的研究,可见光通信将实现更快的发展,并将会在 6G 中大放异彩。

## 参考文献

- [1] YANG P, XIAO Y, XIAO M, et al. 6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques[J]. IEEE Network, 2019, 33(4): 70–75. DOI:10.1109/mnet.2019.1800418
- [2] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 28–41. DOI:10.1109/mvt.2019.2921208
- [3] BURCHARDT H, SERAFIMOVSKI N, TSON- EV D, et al. VLC: Beyond Point-to-Point Communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 98–105. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6852089
- [4] WANG Y G, TAO L, HUANG X X, et al. 8-Gb/s RGBY LED-Based WDM VLC System Employing High-Order CAP Modulation and Hybrid Post Equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1–7. DOI:10.1109/jphot.2015.2489927
- [5] QIAO L, LU X Y, LIANG S Y, et al. Performance Analysis of Space Multiplexing by Superposed Signal in Multi-dimensional VLC System[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 19762. DOI:10.1364/oe.26.019762
- [6] CHI N. LED-Based Visible Light Communications[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018: 13–38. DOI:10.1007/978-3-662-56660-2\_2
- [7] WANG F M, LIU Y F, SHI M, et al. 3.075 Gb/s Underwater Visible Light Communication Utilizing Hardware Pre-equalizer with Multiple Feature Points[J]. Optical Engineering, 2019, 58(5): 1. DOI:10.1117/1.oe.58.5.056117
- [8] FUJIEDA I, KOSUGI T, INABA Y. Speckle Noise Evaluation and Reduction of an Edge-Lit Backlight System Utilizing Laser Diodes and an Optical Fiber[J]. Journal of Display Technology, 2009, 5(11): 414–417. DOI:10.1109/jdt.2009.2027612
- [9] LI J H, FADIL A, OU H Y, et al. Enhancement of the Modulation Bandwidth for Surface Plasmon Coupled LEDs for Visible Light Communication[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Washington D.C.: OSA, 2016. DOI:10.1364/cleo\_si.2016.stu3r.2
- [10] SUN Z K, TENG D D, LIU L L, et al. A Power-Type Single GaN-Based Blue LED with Improved Linearity for 3 Gb/s Free-Space VLC without Pre-equalization[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1–8. DOI:10.1109/jphot.2016.2564927
- [11] ZHOU Y J, ZHU X, HU F C, et al. Common-anode LED on a Si Substrate for beyond 15 Gbit/s Underwater Visible Light Communication[J]. Photonics Research, 2019, 7(9): 1019. DOI:10.1364/prj.7.001019
- [12] BIAN R, TAVAKKOLNIA I, HAAS H. 15.73 Gb/s Visible Light Communication with Off-the-Shelf LEDs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2418–2424. DOI:10.1109/jlt.2019.2906464
- [13] LI J H, HUANG X X, JI X M, et al. An Integrated PIN-array Receiver for Visible Light Communication[J]. Journal of Optics, 2015, 17(10): 105805. DOI:10.1088/2040-8978/17/10/105805
- [14] LI J H, XU Y F, SHI J Y, et al. A 2×2 Imaging MIMO System Based on LED Visible Light Communications Employing Space Balanced Coding and Integrated PIN Array Reception[J]. Optics Communications, 2016, 367: 214–218. DOI:10.1016/j.optcom.2016.01.041
- [15] TUT T, BIYIKLI N, KIMUKIN I, et al. High Bandwidth-Efficiency Solar-Blind AlGaIn Schottky Photodiodes with Low Dark Current[J]. Solid-State Electronics, 2005, 49(1): 117–122. DOI:10.1016/j.sse.2004.07.009
- [16] GUO Y L, LIU C, TANAKA H, et al. Air-Stable and Solution-Processable Perovskite Photodetectors for Solar-Blind UV and Visible Light[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2015, 6(3): 535–539. DOI:10.1021/jz502717g
- [17] VEREVKIN A A, ZHANG J, SLYSZ W, et al. Superconducting Single-Photon Detectors for GHz-Rate Free-Space Quantum Communications[J]. Free-Space Laser Communication and Laser Imaging II, 2002, (4821): 447–454
- [18] VERMA V B, KORZH B, BUSSIERES F, et al. High-Efficiency Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors Fabricated from MoSi Thin-Films[J]. Optics Express, 2015, 23: 33792
- [19] SLICHTER D H, VERMA V B, LEIBFRIED D, et al. UV-Sensitive Superconducting Nanowire Single Photon Detectors for Integration in an Ion Trap[J]. Optics Express, 2017, 25(8): 8705. DOI:10.1364/oe.25.008705
- [20] DONG Y R, SHI M, YANG X L, et al. Nanopatterned Luminescent Concentrators for Visible Light Communications[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21926. DOI:10.1364/oe.25.021926
- [21] YANG X, SHI M, YU Y, et al. Enhancing Communication Bandwidths of Organic Color Converters Using Nanopatterned Hyperbolic Metamaterials[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(10): 1862–1867
- [22] HUANG X X, CHEN S Y, WANG Z X, et al. 2.0-Gb/s Visible Light Link Based on Adaptive Bit Allocation OFDM of a Single Phosphorescent White LED[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(5): 1–8. DOI:10.1109/jphot.2015.2480541
- [23] WANG Y, LU Z Q, MA M L, et al. Compact Broadband Directional Couplers Using Subwavelength Gratings[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(3): 1–8. DOI:10.1109/jphot.2016.2574335
- [24] ZHANG M J, SHI M, WANG F M, et al. 4.05-Gb/s RGB LED-Based VLC System Utilizing PS-Manchester Coded Nyquist PAM-8 Mod-

- ulation and Hybrid Time-Frequency Domain Equalization[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington D.C., USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w2a.42
- [25] CHI N, ZHAO J Q, WANG Z X. Bandwidth-Efficient Visible Light Communication System Based on Faster-than-Nyquist Pre-Coded CAP Modulation[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(8): 080601. DOI:10.3788/col201715.080601
- [26] HUANG X X, SHI J Y, LI J H, et al. A Gb/s VLC Transmission Using Hardware Preequalization Circuit[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(18): 1915-1918. DOI:10.1109/lpt.2015.2445781
- [27] ZHOU Y J, SHI J Y, WANG Z X, et al. Maximization of Visible Light Communication Capacity Employing Quasi-Linear Preequalization with Peak Power Limitation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016: 1-8. DOI:10.1155/2016/6902152
- [28] WANG Y G, TAO L, HUANG X X, et al. 8-Gb/s RGBY LED-Based WDM VLC System Employing High-Order CAP Modulation and Hybrid Post Equalizer[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-7. DOI:10.1109/jphot.2015.2489927
- [29] ZHU X, WANG F M, SHI M, et al. 10.72Gb/s Visible Light Communication System Based on Single Packaged RGBYC LED Utilizing QAM-DMT Modulation with Hardware Pre-Equalization[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington D.C., USA: OSA, 2018. DOI:10.1364/ofc.2018.m3k.3
- [30] SHI M, WANG C F, LI G Q, et al. A 5Gb/s  $2 \times 2$  MIMO Real-Time Visible Light Communication System Based on Silicon Substrate LEDs[C]//2019 Global LIFI Congress (GLC). Paris, France: IEEE, 2019. DOI:10.1109/glc.2019.8864120
- [31] FEI C, HONG X J, ZHANG G W, et al. 166 Gbps Data Rate for Underwater Wireless Optical Transmission with Single Laser Diode Achieved with Discrete Multi-Tone and Post Nonlinear Equalization[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34060. DOI:10.1364/oe.26.034060
- [32] LI C Y, LU H H, TSAI W S, et al. A 5 M/25 Gbps Underwater Wireless Optical Communication System[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-9. DOI:10.1109/jphot.2018.2842762
- [33] LI J H, WANG F M, ZHAO M M, et al. Large-Coverage Underwater Visible Light Communication System Based on Blue LED Employing Equal Gain Combining with Integrated PIN Array Reception[J]. Applied Optics, 2019, 58(2): 383. DOI:10.1364/ao.58.000383
- [34] HU F C, LI G Q, ZOU P, et al. 20.09-Gbit/s Underwater WDM-VLC Transmission Based on a Single Si/GaAs-Substrate Multichromatic LED Array Chip[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020. Washington D.C., USA: OSA, 2020. DOI:10.1364/ofc.2020.m3i.4
- [35] CHEN M, ZOU P, ZHANG L, et al. Demonstration of a 2.34 Gbit/s Real-Time Silicon-Substrate Blue LED-Based Underwater VLC System[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(1): 1-11. DOI:10.1109/jphot.2019.2958969
- [36] ZEDINI E, OUBEI H M, KAMMOUN A, et al. Unified Statistical Channel Model for Turbulence-Induced Fading in Underwater Wireless Optical Communication Systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(4): 2893-2907. DOI:10.1109/tcomm.2019.2891542
- [37] CHI N, ZHAO Y H, SHI M, et al. Gaussian Kernel-Aided Deep Neural Network Equalizer Utilized in Underwater PAM8 Visible Light Communication System[J]. Optics Express, 2018, 26(20): 26700. DOI:10.1364/oe.26.026700
- [38] ZHAO Y H, ZOU P, YU W X, et al. Two Tributaries Heterogeneous Neural Network Based Channel Emulator for Underwater Visible Light Communication Systems[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22532. DOI:10.1364/oe.27.022532
- [39] WANG Y Q, SHI J Y, YANG C, et al. Integrated 10 Gb/s Multilevel Multiband Passive Optical Network and 500 Mb/s Indoor Visible Light Communication System Based on Nyquist Single Carrier Frequency Domain Equalization Modulation[J]. Optical Letter. 2014, (39):2576-2579
- [40] WANG Y G, CHI N, WANG Y Q, et al. Network Architecture of a High-Speed Visible Light Communication Local Area Network[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(2): 197-200. DOI:10.1109/lpt.2014.2364955
- [41] SHI J Y, ZHOU Y J, CHI N, et al. Gigabit LED-Based Visible Light Transparent Transmission from Free-Apace to a 100-m Ultra-Large Effective Area Pure Silica Fiber[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 60(1): 13-18. DOI:10.1002/mop.30914
- [42] JOHNSON L J, GREEN R J, LEESON M S. Hybrid Underwater Optical/Acoustic Link Design[C]//2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Graz, Austria: IEEE, 2014. DOI:10.1109/icton.2014.6876491

## 作者简介



迟楠, 复旦大学教授、博士生导师; 长期从事高速光通信和高速可见光通信方面的研究, 主要研究高速效率多维多阶光调制技术和数字信号处理技术; 获教育部自然科学二等奖、中国产学研合作创新一等奖、国际工业博览会创新奖等各 1 项; 发表 SCI 检索论文 260 余篇, 累计 SCI 他引 2 400 余次, Google 引用 6 100 余次, 4 篇 ESI 高被引论文, 出版专著 5 部, 获发明专利 18 项, 多项技术入选国家标准和 IEEE 标准提案。



贾俊连, 复旦大学通信系在读博士生; 研究方向为高速可见光通信。



# 智能微波光子射频 前端与链路

Intelligent Microwave Photonic RF Frontends and Links



邹喜华 / ZOU Xihua, 李沛轩 / LI Peixuan, 刘丰玮 / LIU Fengwei

(西南交通大学, 四川 成都 611756)  
(Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**摘要:** 射频 (RF) 前端与链路是雷达、通信、电子战等系统中的核心功能模块。新一代智能无线系统的大带宽、多频段、可重构信号处理与传输需求对 RF 前端与链路的研发提出一系列挑战。基于微波光子技术的 RF 前端与链路具有大带宽、低损耗和抗电磁干扰等优势, 能够很好地满足新一代智能无线系统的需求。重点围绕可重构、多信道 / 阵列化收发 RF 前端和大动态范围、高相位稳定性、多业务融合的微波光子 RF 链路, 介绍与分析智能微波光子射频前端与链路的发展现状与研究动态。

**关键词:** 微波光子; RF 前端与链路; 智能 RF 系统

**Abstract:** Radiofrequency (RF) frontends and links are the key modules for microwave systems like radar, communication, and electronic warfare. The requirements of new-generation intelligent RF system on broad bandwidth, multi-band spectra and reconfigurability bring new challenges to the development of RF frontends and links. Both RF frontends and RF links assisted by the microwave photonics can provide a very promising solution to address above challenges with advantages of broadband, low loss and immunity to electromagnetic interference. In this paper, a comprehensive overview to the intelligent microwave photonic RF frontends and links is presented, focusing on reconfigurable, multi-channel/channelized transceiver frontends and microwave links featuring large dynamic range, high phase stability and multi-service convergence.

**Keywords:** microwave photonics; RF frontend and link; intelligent RF system

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200409.1700.004.html>

网络出版日期: 2020-04-10

收稿日期: 2020-02-19

随着新一代信息技术的不断发展演进, 各种不同频段、制式的通信标准和无线业务不断涌现, 导致无线系统的多样性与异构性越来越明显, 主要表现为: 多种不同通信制式、标准共存, 例如, 已经开始商用的 5G、

目前主流的 4G 以及拥有一定用户存量的 3G 和 2G; 各种不同功能的无线业务共存, 例如, 无线局域网、蓝牙、北斗和全球定位系统 (GPS) 导航等; 不同频段射频信号共存, 覆盖几十兆赫兹的微波到几十吉赫兹的毫米波甚至太赫兹波。在此背景下, 无线系统不断朝着智能化方向发展, 一方面能够进行宽带多频段、多功能、多标准信号的无缝兼容与融合; 另一方面具

有灵活可重构特性, 可根据系统功能、服务对象、应用场景进行不同频段、标准无线信号的切换与优化组合, 以达到资源利用最大化。

射频前端与链路是无线系统的基础组成部分, 承担着无线信号的收发处理与传输等关键任务; 因此, 发展具有大带宽、多频段以及可重构特性的智能射频前端与链路对无线系统的进一步演进至关重要。现有基于传统

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2019YFB2203204)、国家自然科学基金 (61922069)、国家“863”计划课题 (2015AA016903)、四川省科技计划资助 (2019JDJQ0022, 2018HH0002)



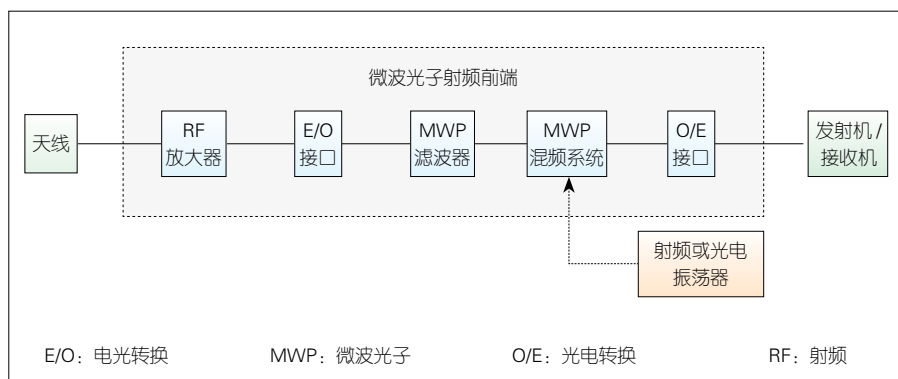
电子技术的射频前端与链路存在着高频损耗大、带宽窄、处理速度低等诸多瓶颈问题,难以满足无线系统的智能化发展需求。近些年来,微波光子学的快速兴起、成熟为上述问题的解决提供了新的方法和思路。微波光子系统将传统电子学难以处理的高频、宽带微波信号调制到光域上,借助于光子学器件或者技术的低损耗、大带宽以及抗电磁干扰等本征优势进行宽带、高频微波信号的产生、传输、处理、检测和控制等<sup>[1]</sup>。微波光子技术能够有效地缓解传统电子学技术在处理和传输高频段、大带宽、动态时变微波信号时所面临的困境;因此,满足宽带、多频段以及可重构等特性的微波光子智能射频前端与链路是近些年来微波射频器件研究的热点。

## 1 智能微波光子射频前端

射频前端位于无线系统最前端,负责连接收发机与天线,是整个系统性能好坏的决定性因素之一。随着 5G 移动通信及物联网的应用部署,以及为满足现代电子战中雷达的高性能需求,射频前端需要处理的信号不断变得更加复杂,向着超高频、多种调制格式、多频段、多波束收发和多点无线资源协同等智能化方向发展。然而,由于不同频段使用的电子元件截然不同,电子射频前端难以通过堆叠射频模块来实现跨多波段甚至全通信波段的可调谐和可重构功能;因此,具有可调谐可重构优点的宽带微波光子射频前端应运而生,并日益发展壮大。

### 1.1 可重构收发射频前端

微波光子收发射频前端主要结构如图 1 所示。同传统的电射频前端一样,微波光子射频前端(MPRF)需要完成信号放大、滤波、本地振荡(LO)信号产生、针对发送和接收的上下变



▲图 1 微波光子收发前端示意图

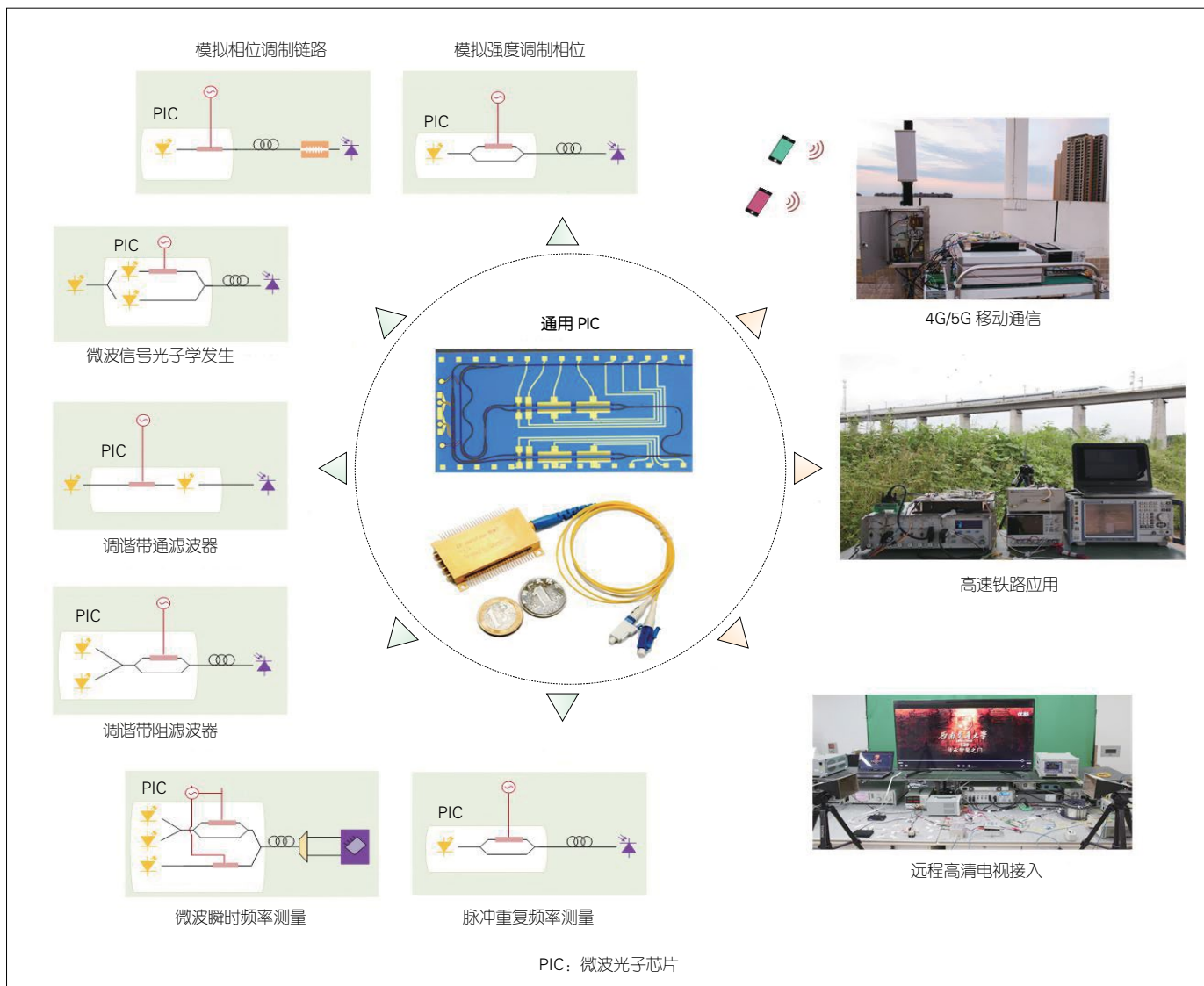
频等。而不一样的是,MPRF 一方面将射频信号变换到光域,利用微波光子技术的大带宽优势替代电子器件实现信号滤波和混频等处理功能,以兼容多频段、多制式、多功能信号;另一方面可通过光子技术产生高频、可调谐的 LO 信号。

目前,可重构 MPRF 的研究主要集中于利用微波光子混频技术的宽带优势,实现发送和接收信号的宽带可调谐上、下变频,以满足智能系统的多频段信号兼容与灵活可重构需求。美国 Vencore 实验室的研究人员针对接收射频前端,利用外调制产生光梳多频本振,在实验中将 2 ~ 18 GHz 范围的射频信号下变频至 2 GHz 中频频段<sup>[3]</sup>。南京航空航天大学的研究人员利用外调制产生双光梳本振,研制了 S 波段到 Ka 波段的收发射频前端<sup>[4]</sup>。意大利国家光电实验室的研究人员利用锁模激光器产生光频梳本振,实现了信号的可调谐上、下变频接收与发送,频率调谐范围为 2 ~ 18 GHz<sup>[5]</sup>。清华大学的研究人员提出了一种基于光电振荡器(OEO)的可调谐宽带光子射频前端方案,可调谐频率范围可覆盖 X 波段到 Ka 波段<sup>[6]</sup>。此外,该课题组还利用基于光频梳和色散介质的微波光子滤波器构造接收射频前端,在实现信号下变频接收的同时进行中频滤波,频率覆盖范围大于 20 GHz<sup>[7]</sup>。

此外,可重构 MPRF 的芯片集成是最近兴起的热点研究方向,以提供低成本、小体积和高可靠的光子射频前端解决方案。清华大学的研究人员提出一种基于硅基集成的微波光子收发前端<sup>[8]</sup>,利用片上相位外调制产生光本振,实现的发送信号调谐范围为 2 ~ 10 GHz,可处理的接收信号频率覆盖为 2 ~ 15 GHz。西南交通大学的团队研发了一种通用的微波光子集成芯片(PIC)<sup>[9]</sup>,如图 2 所示。该芯片单片集成了多个可调谐的激光器、调制器和耦合器,实现微波光子链路结构和信号流向的重构,能够灵活配置,跨越微波信号产生、传输和处理 3 大核心领域实施多项功能,包括远端信号产生、强度/相位调制的微波光子传输链路、可调谐带通/带阻滤波器、微波瞬时频率测量、微波脉冲重复频率测量等。该芯片直接应用于承载室内和室外场景的日常实时业务:直接部署在成都-重庆(成渝)高铁线路沿线,针对电磁干扰进行监测;被嵌入到 4G/5G 无线通信系统和 4K 高清视频接入系统,支撑日常实时业务。

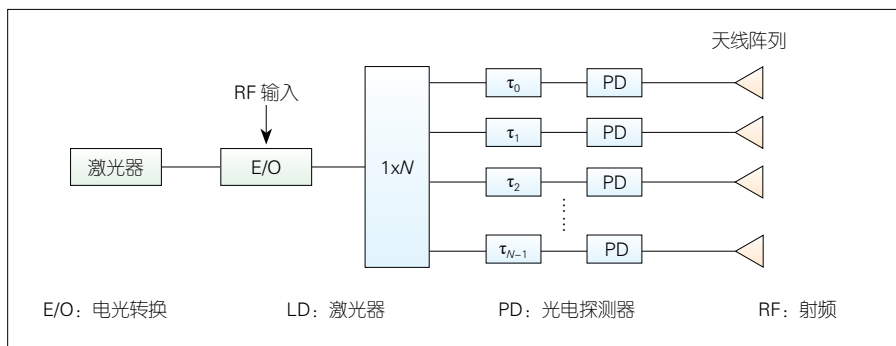
### 1.2 多信道/阵列化收发射频前端

多信道/阵列化收发前端分为两部分讨论:一部分是光子真时延相控阵收发前端,另一部分是宽带信号的信道化接收前端。



▲图2 通用微波光子芯片及其应用于室内和室外场景的日常实时业务承载示意图<sup>[10]</sup>

相控阵收发前端通过控制各个阵元幅度和相位来实现射频信号的高效定向覆盖，能够有效降低系统损耗，增加覆盖范围，降低附加干扰；因此，相控阵收发前端在雷达、无线通信等射频微波领域具有非常重要的应用。基于光子真时延的波束赋形技术因其能够充分利用光子技术的抗电磁干扰、重量轻、体积小、低损耗、高带宽等优势，有望替代现有带宽受限电子技术来满足射频智能系统的宽谱灵活覆盖需求。基于光子真时延波束赋形的阵列化收发前端基本结构如图3所示：



▲图3 基于光子真时延的相控阵收发前端示意图

射频信号经电光转换至光域，通过光子学手段对射频信号进行群时延调控，最终获得多路不同延时的天线馈送射

频信号。实现光子真时延相控阵收发前端的关键在于光域群时延操控方法。1991年，美国 W. NG 等首次利用固定

长度的光纤和光开关实现了光子真时延相控阵天线系统,实现了 2 GHz 和 9 GHz 射频信号的波束扫描<sup>[11]</sup>。美国海军研究实验室提出了利用波长相关的色散效应实现光子真时延的方案,在 2 ~ 18 GHz 工作带宽内波束扫描角大于 100°<sup>[12]</sup>。西班牙瓦伦西亚理工大学团队利用受激布里渊(SBS)散射的慢光效应实现光子真时延,延迟时间为 0 ~ 10 ns<sup>[13]</sup>。澳大利亚斯温伯恩技术大学和清华大学的研究人员基于小型化的微谐振腔产生光学频率梳作为多波长光源,有效增加光子真时延相控阵系统可支持的天线单元数目<sup>[14-15]</sup>,最高可达 81 个。美国俄亥俄州立大学的研究人员则基于集成的空间光学器件提供光子真时延,可支持的天线单元数目高达 112 个,射频覆盖范围超过 20 GHz<sup>[16]</sup>。南京航空航天大学的研究团队提出利用微波光子滤波方法实现多波束光子真时延相控阵系统<sup>[17]</sup>。

微波光子信道化接收机通过光子技术、器件在光域将宽带射频信号划分成若干均匀/非均匀子信道,便于后续的进一步精细处理,能够满足智能系统的宽带多频段信号感知接收需求。根据实现结构的不同,微波光子信道化接收机大致可分为 3 类,分别为空分复用型(SDM)、波分复用型(WDM)以及时分复用型(TDM)<sup>[18]</sup>。SDM 型号微波光子信道化接收机利用空间滤波器将射频信号分离成多个并行信道,每个信道包含一部分射频信号频谱的分离。美国 New Focus 公司的研究人员基于自由空间衍射光纤对射频信号实施信道化,获得了 1 GHz 的信道分辨率,总瞬时带宽超过了 100 GHz<sup>[19]</sup>。WDM 微波光子信道化接收机利用光信道化滤波在光波长域对射频信号进行频谱切割,使得每个光波长信道对应于一部分射频信号的频谱分量,最终通过波分解复用获得多个平行且频谱分离的信道。西南

交通大学课题组基于多个不同中心频率的 SBS 增益谱进行光域信道化滤波,信道分辨率可达十几兆赫兹<sup>[20]</sup>。北京邮电大学研究人员结合两个相干光频率梳和相干解调技术解决了 WDM 方案需要频域精细滤波和精确波长对准的问题,实验中获得 7 个带宽为 0.5 GHz 的信道,频谱覆盖 3.75 ~ 7.25 GHz<sup>[21]</sup>。南京航空航天大学研究人员利用 2 个相干光频率梳以及 SBS 效应实现信道化接收机,获得的信道间隔可以小于 80 MHz<sup>[22]</sup>。TDM 型微波光子信道化接收机主要通过光波长扫描或者光频循环模块将射频信号的频谱映射至时域,借助于时域控制开关在时间域进行射频信号频谱分离,即一段时间对应于一部分频谱分量。清华大学研究人员结合循环光频移和时域光开关,实现了 20 GHz 宽谱信号的信道化,系统分辨率可达 2 MHz<sup>[23]</sup>。

## 2 智能微波光子射频链路

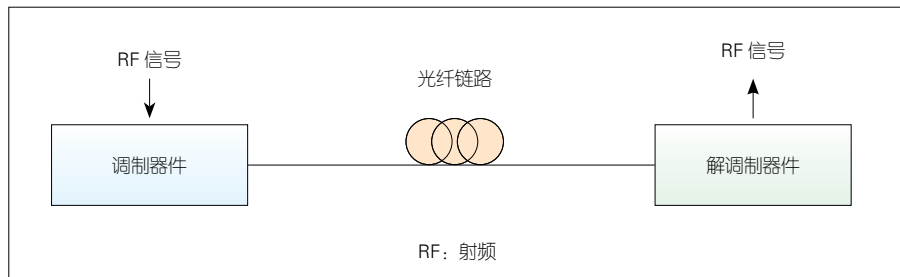
微波光子射频链路(MPRL)的基本模型如图 4 所示:首先将模拟射频信号经电光调制器件加载至光载波上,再利用光纤链路进行远端分发,最后经光电解调器件恢复出射频信号。面向智能化系统的应用,MPRL 面临的核心挑战是如何保证多种不同频段、不同制式射频信号的高保真度输出,涉及的链路特性有动态范围、相位稳定度以及不同频段、制式射频信号的兼容性。下面我们围绕上述 3 个问题,分别介绍大动态范围

MPRL、高相位稳定性 MPRL,以及多业务融合 MPRL。

### 2.1 大动态范围微波光子射频链路

MPRL 的动态范围表征链路可处理信号的幅度范围,其下限取决于链路的噪声性能,上限取决于链路的非线性特性;因此,抑制噪声和消除非线性是提升动态范围的关键。MPRL 的噪声抑制主要有两种方法:一种是低偏置马赫-曾德尔调制器(MZM)<sup>[24]</sup>,通过将低光生电流抑制光电探测器散粒噪声和激光器相对强度噪声(RIN);另一种基于平衡探测技术<sup>[25]</sup>抑制激光器的 RIN。相较于噪声的随机性,MPRL 的非线性失真来源明确(主要来源于调制器件与光电探测器件的非线性,且在绝大多数情况下,调制器件的调制非线性作用占主导地位),产生机理又较为清楚,通过链路的非线性失真补偿往往能够以较小的代价获得较大的动态范围的收益提升;因此,MPRL 线性化一直以来都是大动态范围 MPRL 研究的热点与重点。已报道的 MPRL 线性化方法大致可分为前馈线性化、模拟预失真、数字线性化和全光线性化等。

前馈线性化与模拟预失真技术均借鉴于传统的电放大器线性化方法。前馈线性化方案需要两条光电链路:一条链路进行错误信息提取,另外一条将此错误信息传输至接收端与接收信号结合以实现非线性失真消



▲图 4 微波光子链路基本模型



全光线性化利用光子技术进行非线性失真补偿,具有大带宽的优势,是近年来的研究热点。全光线性化的主流方法为利用较为复杂的级联或并联调制结构,结合参数优化设置获得两路非线性特性相反或相同的调制路径,最终通过两路非线性失真的相互抵消实现链路的线性化。美国麻省理工学院的课题组利用级联 MZM 结构,并通过非线性失真的抑制获得了  $132 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{4/5}$  的 SFDR 性能<sup>[31]</sup>。美国加州大学洛杉矶分校的研究人员基于

双MZM并联结构进行MPRL的线性化,理论上可获得  $144 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{4/5}$  的SFDR性能<sup>[32]</sup>。清华大学的研究人员进一步地提出了更为简单、稳定的基于双平行MZM(DPMZM)的线性化方案,实验上获得了  $122.9 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$  的SFDR性能<sup>[33]</sup>。加拿大渥太华大学研究团队基于偏振调制器和Sagnac环方案,实现超过50 dB的IMD3抑制,SFDR可达  $121 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3[34]}$ 。西南交通大学课题组利用铌酸锂相位调制器的偏振特性实现了MPRL的线性化<sup>[35]</sup>,结构简单且无偏置漂移。

## 2.2 高相位稳定性微波光子射频链路

利用 MPRL 的低损耗、抗电磁干扰、大带宽等优势进行射频信号的长距离稳相传输,在射电天文学、深空网络、分布式合成孔径雷达、高精度时钟信号分配以及粒子加速器等系统中具有重要的应用价值。温度变化、机械振动等环境扰动所造成的光纤有效折射率与长度变化会引起 MPRL 传输射频信号的相位随机抖动,经时间积累,会严重影响系统的正常工作;因此,实现高相位稳定射频信号传输是 MPRL 非常重要的研究方向。

当前, MPRL 稳相传输方法主要分为两大类, 一类为主动式稳相传输技术, 其基本结构如图 5 所示<sup>[36]</sup>, 其核心思路为提取链路往返信号的相位

抖动信息, 以此反馈控制电路或者光路时延, 从而补偿射频信号在 MPRL 传输中的相位抖动。德国联邦物理技术研究院的研究人员通过压控振荡器 (VCO) 反馈控制进行电路时延调节, 实现了射频信号的 146 km 长距离稳相传输, 1 s 和 30 000 s 频率稳定度分别为  $3 \times 10^{-15}$  和  $1 \times 10^{-19[37]}$ 。法国巴黎天文台的研究人员利用了 VCO 电路延时反馈控制, 实现了 176 km 的射频信号稳相传输, 1 s 和 10 000 s 频率稳定度分别达到了  $10^{-16}$  和  $10^{-19}$  量级<sup>[38]</sup>。北京大学的研究人员反馈控制电相移器实现了 100 MHz 信号的 100 km 稳相传输, 1 s 和 4 000 s 频率稳定度分别为  $3 \times 10^{-14}$  和  $3 \times 10^{-17[39]}$ 。法国巴黎大学的研究人员利用压电陶瓷光纤延迟线的反馈控制补偿光路时延抖动, 实现了 1 s 和 1 d 频率稳定度分别为  $1.3 \times 10^{-15}$  和  $1 \times 10^{-18}$ , 传输距离为 86 km, 射频信号频率为 9.15 GHz<sup>[40]</sup>。北京邮电大学的研究团队通过激光器波长的反馈控制进行光路时延抖动补偿, 在 45 km 光纤链路和 2.5 GHz 传输射频信号情况下, 获得的 1 s 和 104 s 频率稳定度分别为  $3.3 \times 10^{-13}$  和  $7.5 \times 10^{-17[41]}$ 。

主动式补偿方法的性能直接取决于电相移器、VCO 和光可调延时线等补偿器件的自身特性, 具有响应速度慢和调谐范围窄等限制。另一类稳相传输技术为被动式补偿方法, 即利用

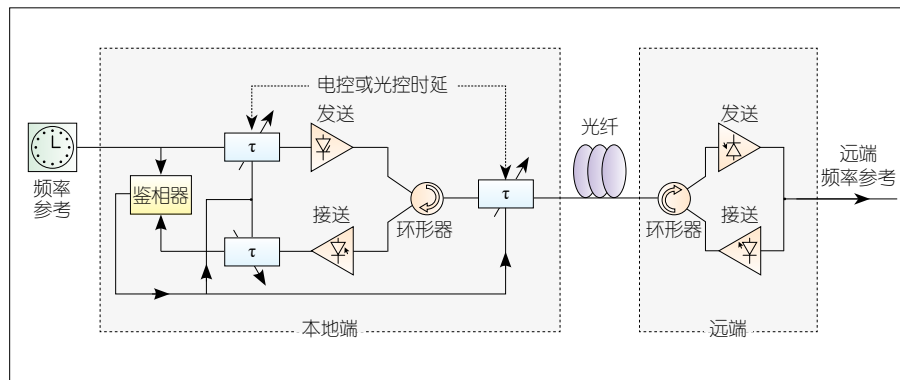


图5 主动式微波光子射频链路稳相传输系统示意图



混频相消的原理进行链路的时延抖动补偿。我们以如图 6 所示的方案<sup>[42]</sup>为例,简要阐述被动式补偿方法的一般原理:射频信号 $\cos(\omega_0 t)$ 在本地端二分频后经 MPRL 传输至远端,设链路传输带来的相位变化为 $\theta$ ,则在远端的射频信号变为 $\cos[0.5\omega_0(t-\theta)]$ 。该信号分成两路,一路回传至本地端与发送射频信号混频后得到的第二路的发送信号 $\cos[0.5\omega_0(t+\theta)]$ ,另外一路与该混频信号在远端混频,最终消除相位项 $\theta$ ,从而有效补偿光纤链路的相位抖动。

该方法不仅结构简单、补偿速度快,且理论上具有无限的补偿范围;因此是近些年来高稳相 MPRL 的研究热点。北京邮电大学的研究人员利用三级混频的结构,实现了相位抖动小于 0.25 rad 的 2.8 GHz 射频信号 10 km 稳相传输<sup>[43]</sup>,并进一步优化了方案,在仅需本地端一级混频情况下,实现了 2.42 GHz 射频信号在 30 km 光纤链路中的稳相传输,获得的均方根相位漂移小于 0.026 rad<sup>[44]</sup>。南京航空航天大学的研究团队在仅需一个微波源和两级混频情况下进行了 6 GHz 射频信号的 20 km 光纤稳相传输,信号的均方根时间抖动小于 1.33 ps<sup>[45]</sup>。澳大利亚麦考瑞大学的研究人员则在 100 km MPRL 中验证了混频相消方法的可行性,1 万秒频率稳定度为 $1 \times 10^{-17}$ <sup>[46]</sup>。中国计量科学研究院-清华大学精密测量联合实验室、上海交通大学的研究人员进一步将混频相消方法拓展至多点稳相传输系统,获得的频率稳定度分别可达 $7 \times 10^{-17}/10^4 \text{ s}$ <sup>[47]</sup>和 $2000 \text{ s}$ <sup>[48]</sup>。

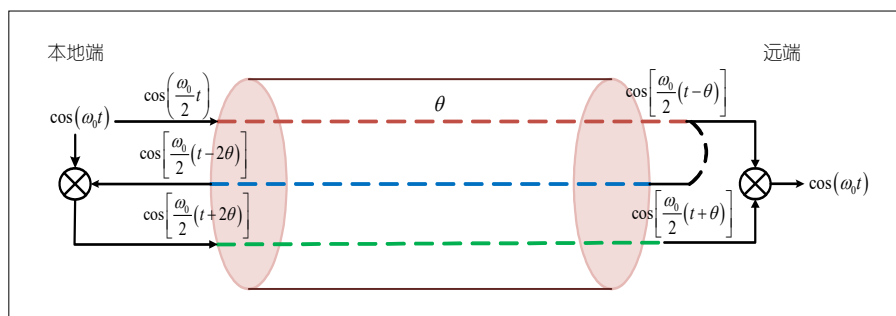
### 2.3 多业务融合的微波光子射频链路

对不同频段、调制格式和标准的信号“透明”是 MPRL 核心优势之一。相较于传统的数字基带传输方式一次只能传输单一业务,基于 MPRL 的光

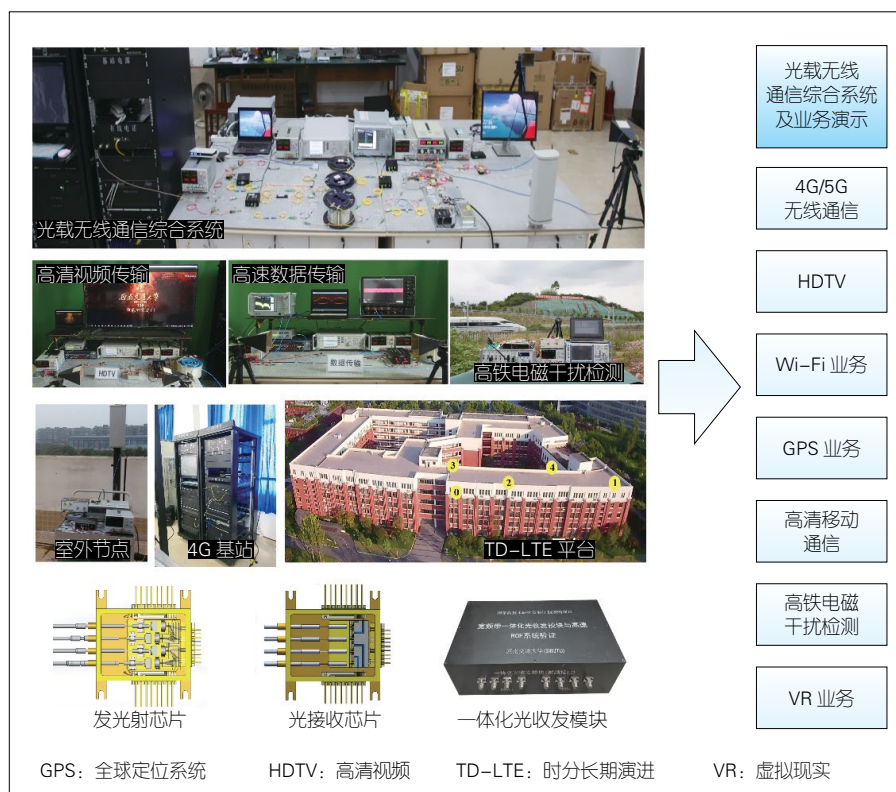
载无线(RoF)系统能够支持多种不同频段、制式的无线业务(包括较低频段的传统无线业务以及毫米波太赫兹业务),并以简化的方式在同一链路中融合传输,从而大幅提高网络的兼容性与可拓展性,支撑未来 5G/5.5G,甚至 6G 异构网络建设。

早在 2007 年,英国剑桥大学研究人员详细研究了支持 3G 和无线局域网(WLAN)两种制式的 RoF 系统。丹麦技术大学的研究人员<sup>[49]</sup>在长达 78 km 的既有光纤传输链路中以波分

复用技术实现了 250 Mbit/s 的 5 GHz 射频、3.125 Gbit/s 的超宽带(UWB)、WiMax 业务融合<sup>[50]</sup>。美国佐治亚理工学院的研究人员提出了一种基于 MPRL 的多业务接入网络架构,实验验证了 Wi-Fi、WiMAX、60 GHz 毫米波 3 种不同业务的融合传输<sup>[51]</sup>。中国台北科技大学的研究人员利用多个注入锁定的 FP 激光器以及波分复用技术,同时传输了 20 GHz 的微波信号、60 GHz 的毫米波信号以及 550 MHz 的有线电视信号<sup>[52]</sup>。日本国立信息与通信研究所的



▲图 6 被动式微波光子射频链路稳相传输原理图



▲图 7 基于一体化光收发模块的微波光子射频链路系统及多业务演示

研究人员利用波分复用技术同时传输了 2.6 GHz 4G LTE-A 信号和 35.4 GHz 毫米波信号,并探讨了该方案在未来通信网络的应用前景<sup>[53]</sup>。西班牙瓦伦西亚理工大学的研究人员利用基于多模光纤的 RoF 系统,同时传输了 2G/3G/4G 全球移动通信系统 (GSM) 信号<sup>[54]</sup>。南京航空航天大学的研究人员利用双偏振双平行马赫-曾德尔调制器作为 RoF 系统的光发射机,实现了 11.1 Gbit/s 的高清视频信号和多个不同频段的 16 QAM 信号 (3 GHz、5 GHz、60 GHz) 的融合传输<sup>[55]</sup>。英国伦敦大学学院的研究人员致力于更高频段信号的融合传输,实验验证了 5 个频段覆盖 220 ~ 280 GHz 的亚太赫兹信号在 10 km RoF 系统中的同时传输<sup>[56]</sup>。

西南交通大学研究团队围绕多通道微波光子收发阵列封装设计展开研究,研制了集成宽带一体化光收发模块,并实施了低成本、小尺寸、低功耗高速宽带无线接入方案,搭建了具有 5 个节点的多业务融合的 MPRL 演示平台,如图 7 所示。研究人员进而在该平台上验证和演示了 2.97 Gbit/s 的高速无线接入、无压缩 1 080 P 制式高清视频传输、TD-LTE 视频通信,以及高速移动场景下 (如 350 km/h 高铁) 500 Mbit/s 的无线接入速率。

### 3 结束语

基于微波光子技术的智能射频前端与链路具有大带宽、可重构、业务透明等优势,能够充分满足新一代信息技术的智能化发展需求。全球大量的课题组已经在此领域辛勤耕耘,并取得了一系列创新成果。与此同时,微波光子智能射频前端与链路还需要进一步解决成本、功耗、体积、噪声等方面的问题,为新一代信息技术的演进和变革提供核心支撑。

### 致谢

西南交通大学信息光子与通信研究中心潘炜教授、闫连山教授、罗斌教授,以及全体师生在论文撰写过程中给予了很多支持和贡献,在此深表感谢!

#### 参考文献

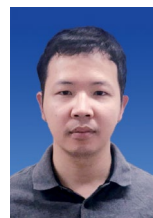
- [1] YAO J P. Microwave Photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314–335. DOI:10.1109/jlt.2008.2009551
- [2] CLARK T, WATERHOUSE R. Photonics for RF Front Ends[J]. IEEE Microwave Magazine, 2011, 12(3): 87–95. DOI:10.1109/mmm.2011.940319
- [3] AGARWAL A, DAILEY J M, TOLIVER P, et al. Photonic-Enabled RF Front-End for Wideband Flexible Down-Conversion[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7338. DOI:10.1364/oe.25.007338
- [4] ZHU D, CHEN W J, CHEN Z W, et al. RF Front-end Based on Microwave Photonics[C]//2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC). Singapore: IEEE, 2017. DOI:10.1109/oecc.2017.8114850
- [5] SCOTTI F, ONORI D, BOGONI A, et al. Frequency-Agile and Filter-Free Wireless Communication Transceiver Based on Photonics[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington D.C., USA: OSA, 2018. DOI:10.1364/ofc.2018.m2g.2
- [6] YU H, CHEN M, GAO H, et al. RF Photonic Front-End Integrating with Local Oscillator Loop[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 3918. DOI:10.1364/oe.22.003918
- [7] WANG J J, CHEN M H, LIANG Y H, et al. Broadband RF Front-End Using Microwave Photonics Filter[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 839. DOI:10.1364/oe.23.000839
- [8] 霍元东, 于鸿晨, 陈明华. 基于硅基集成的可重构微波光子前端[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(4): 42–45. DOI:10.3969/j.issn.1009-6868.2018.03.008
- [9] ZOU X H, ZOU F, CAO Z Z, et al. Integrated Microwave Photonics: a Multifunctional Photonic Integrated Circuit for Diverse Microwave Signal Generation, Transmission, and Processing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(6): 1970027. DOI:10.1002/lpor.201970027
- [10] ZOU X H, ZOU F, CAO Z Z, et al. Integrated Microwave Photonics Meets Daily Life [EB/OL]. [2020-03-22]. [https://www.osa-opn.org/home/articles/volume\\_30/december\\_2019/extras/integrated\\_microwave\\_photonics\\_meets\\_daily\\_life/](https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_30/december_2019/extras/integrated_microwave_photonics_meets_daily_life/)
- [11] NG W, WALSTON A A, TANGONAN G L, et al. The First Demonstration of an Optically Steered Microwave Phased Array Antenna Using True-Time-Delay[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(9): 1124–1131. DOI:10.1109/50.85809
- [12] FRANKEL M Y, ESMAN R D. True Time-Delay Fiber-Optic Control of an Ultrawideband Array Transmitter/receiver with Multibeam Capability[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995, 43(9): 2387–2394. DOI:10.1109/22.414593
- [13] CHIN S, THÉVENAZ L, SANCHO J, et al. Broadband True Time Delay for Microwave Signal Processing, Using Slow Light Based on Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers[J]. Optics Express, 2010, 18(21): 22599. DOI:10.1364/oe.18.022599
- [14] XU X Y, WU J Y, NGUYEN T G, et al. Photonic Microwave True Time Delays for Phased Array Antennas Using a 49 GHz FSR Integrated Optical Micro-Comb Source [Invited][J]. Photonics Research, 2018, 6(5): B30. DOI:10.1364/prj.6.000b30
- [15] XUE X X, XUAN Y, BAO C Y, et al. Micro-comb-Based True-Time-Delay Network for Microwave Beamforming with Arbitrary Beam Pattern Control[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(12): 2312–2321. DOI:10.1109/jlt.2018.2803743
- [16] ANDERSON B L, HO J G, COWAN W D, et al. Hardware Demonstration of Extremely Compact Optical True Time Delay Device for Wideband Electronically Steered Antennas[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1343–1353. DOI:10.1109/jlt.2011.2124444
- [17] YE X W, ZHANG F Z, AND PAN S L. Optical True Time Delay Unit for Multi-Beamforming [J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10002–10008. DOI:10.1364/OE.23.010002
- [18] ZOU X H, LU B, PAN W, et al. Photonics for Microwave Measurements (Laser Photonics Reviews, 2016, 10(5): 700. DOI:10.1002/lpor.201670056
- [19] WANG W S, DAVIS R L, JUNG T J, et al. Characterization of a Coherent Optical RF Channelizer Based on a Diffraction Grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(10): 1996–2001. DOI:10.1109/22.954820
- [20] ZOU X H, LI W Z, PAN W, et al. Photonic-Assisted Microwave Channelizer with Improved Channel Characteristics Based on Spectrum-Controlled Stimulated Brillouin Scattering[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(9): 3470–3478. DOI:10.1109/tmtt.2013.2273892
- [21] XIE X J, DAI Y T, XU K, et al. Broadband Photonic RF Channelization Based on Coherent Optical Frequency Combs and I/Q Demodulators[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(4): 1196–1202. DOI:10.1109/jphot.2012.2207380
- [22] XU W Y, ZHU D, PAN S L. Coherent Photonic RF Channelization Based on Stimulated Brillouin Scattering[C]//2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Paphos, Cyprus: IEEE, 2015. DOI:10.1109/mwp.2015.7356719
- [23] LI R Y, CHEN H W, YU Y, et al. Multiple-Frequency Measurement Based on Serial Photonic Channelization Using Optical Wavelength Scanning[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4781. DOI:10.1364/ol.38.004781
- [24] FARWELL M L, CHANG W S C, HUBER D R. Increased Linear Dynamic Range by Low Biasing the Mach-Zehnder Modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7):

- 779–782. DOI:10.1109/68.229804
- [25] MADJAR A, MALZ O. A Balanced Fiber-optic Communication Link Featuring Laser RIN Cancellation[C]//1992 IEEE Microwave Symposium Digest MTT–S. Albuquerque, USA: IEEE, 1992:563–566. DOI:10.1109/mwsym.1992.188043
- [26] O'CONNOR S R, CLARK T R, NOVAK D. Wideband Adaptive Feedforward Photonic Link[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(15): 2810–2816. DOI:10.1109/jlt.2008.927189
- [27] ZHU R, ZHANG X P, HRAIMEL B, et al. Broad-band Predistortion Circuit Using Zero Bias Diodes for Radio over Fiber Systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(21): 2101–2104. DOI:10.1109/pt.2013.2281409
- [28] PEI Y Q, XU K, LI J Q, et al. Complexity-reduced Digital Predistortion for Subcarrier Multiplexed Radio over Fiber Systems Transmitting Sparse Multi-Band RF Signals[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3708. DOI:10.1364/oe.21.003708
- [29] LAM D, FARD A M, BUCKLEY B, et al. Digital Broadband Linearization of Optical Links[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 446. DOI:10.1364/ol.38.000446
- [30] CLARK T R, O'CONNOR S R, DENNIS M L. A Phase-Modulation I/Q–Demodulation Microwave-to-Digital Photonic Link[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11): 3039–3058. DOI:10.1109/tmtt.2010.2076971
- [31] BETTS G E. Linearized Modulator for Sub-octave-bandpass Optical Analog Links[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1994, 42(12): 2642–2649. DOI:10.1109/22.339809
- [32] ZHU G H, LIU W, FETTERMAN H R. A Broad-band Linearized Coherent Analog Fiber-Optic Link Employing Dual Parallel Mach-Zehnder Modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(21): 1627–1629. DOI:10.1109/pt.2009.2031166
- [33] LI S Y, ZHENG X P, ZHANG H Y, et al. Highly Linear Radio-Over-Fiber System Incorporating a Single-Drive Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(24): 1775–1777. DOI:10.1109/pt.2010.2082516
- [34] LI W, WANG L X, ZHU N H. Highly Linear Microwave Photonic Link Using a Polarization Modulator in a Sagnac Loop[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(1): 89–92. DOI:10.1109/pt.2013.2289938
- [35] CHEN Z Y, YAN L S, PAN W, et al. SFDR Enhancement in Analog Photonic Links by Simultaneous Compensation for Dispersion and Nonlinearity[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 20999. DOI:10.1364/oe.21.020999
- [36] SLIWICZYNSKI L, KREHLIK P, BUCZEK L, et al. Active Propagation Delay Stabilization for Fiber-Optic Frequency Distribution Using Controlled Electronic Delay Lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1480–1488. DOI:10.1109/tim.2010.2090696
- [37] GROSCHKE G, TERRA O, PREDEHL K, et al. Optical Frequency Transfer Via 146 Km Fiber Link with 10–19 Relative Accuracy[J]. Optics Letters, 2009, 34(15): 2270. DOI:10.1364/ol.34.002270
- [38] JIANG H, KÉFÉLIAN F, CRANE S, et al. Long-Distance Frequency Transfer over an Urban Fiber Link Using Optical Phase Stabilization[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(12): 2029. DOI:10.1364/josab.25.002029
- [39] ZHAO J Y, LI D W, NING B, et al. Highly-Stable Frequency Transfer Via Fiber Link with Improved Electrical Error Signal Extraction and Compensation Scheme[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8829. DOI:10.1364/oe.23.008829
- [40] LOPEZ O, AMY-KLEIN A, LOURS M, et al. High-Resolution Microwave Frequency Dissemination on an 86-km Urban Optical Link[J]. Applied Physics B, 2010, 98(4): 723–727. DOI:10.1007/s00340-009-3832-1
- [41] ZHANG A X, DAI Y T, YIN F F, et al. Phase Stabilized Downlink Transmission for Wide-band Radio Frequency Signal Via Optical Fiber Link[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21560. DOI:10.1364/oe.22.021560
- [42] 姜瑶, 邹喜华, 严相雷, 等. 基于被动补偿的点到多点微波信号光纤稳相传输[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 86–92
- [43] WU Z L, DAI Y T, YIN F F, et al. Stable Radio Frequency Phase Delivery by Rapid and End-less Post Error Cancellation[J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1098. DOI:10.1364/ol.38.001098
- [44] YIN F F, ZHANG A X, DAI Y T, et al. Phase-Conjugation-Based Fast RF Phase Stabilization for Fiber Delivery[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 878. DOI:10.1364/oe.22.000878
- [45] WEI J, ZHANG F Z, ZHOU Y G, et al. Stable Fiber Delivery of Radio-Frequency Signal Based on Passive Phase Correction[J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3360. DOI:10.1364/ol.39.003360
- [46] HE Y B, ORR B J, BALDWIN K G H, et al. Stable Radio-Frequency Transfer over Optical Fiber by Phase-Conjugate Frequency Mixing[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18754. DOI:10.1364/oe.21.018754
- [47] BAI Y, WANG B, GAO C, et al. Fiber-Based Radio Frequency Dissemination for Branching Networks with Passive Phase-Noise Cancellation[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(6): 061201. DOI:10.3788/col201513.061201
- [48] LI H W, WU G L, ZHANG J P, et al. Multi-Access Fiber-Optic Radio Frequency Transfer with Passive Phase Noise Compensation[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5672. DOI:10.1364/ol.41.005672
- [49] CRISP M J, LI S, WONFOR A, et al. Demonstration of a Radio over Fibre Distributed Antenna Network for Combined In-Building WLAN and 3G Coverage[C]//OFC/NFOEC 2007 – 2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2007. DOI:10.1109/ofc.2007.4348378
- [50] PRINCE K, JENSEN J B, CABALLERO A, et al. Converged Wireline and Wireless Access over a 78-km Deployed Fiber Long-Reach WDM PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(17): 1274–1276. DOI:10.1109/pt.2009.2025699
- [51] LIU C, ZHANG L, ZHU M, et al. A Novel Multi-Service Small-Cell Cloud Radio Access Network for Mobile Backhaul and Computing Based on Radio-Over-Fiber Technologies[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(17): 2869–2875. DOI:10.1109/jlt.2013.2274193
- [52] LI C Y, LU H H, CHU C A, et al. Hybrid Wireless-over-Fiber Transmission System Based on Multiple Injection-Locked FP LDs[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19874. DOI:10.1364/oe.23.019874
- [53] DAT P T, KANNO A, YAMAMOTO N, et al. Seamless Convergence of Fiber and Wireless Systems for 5G and beyond Networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(2): 592–605. DOI:10.1109/jlt.2018.2883337
- [54] MORANT M, LLORENTE R. Reconfigurable Radio-over-Multicore Optical Fronthaul for Seamless 2G, UMTS and LTE-A MIMO Wireless Provision[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C., USA: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w2a.43
- [55] TANG Z Z, ZHANG F Z, PAN S L. 60-GHz RoF System for Dispersion-Free Transmission of HD and Multi-Band 16QAM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(14): 1305–1308. DOI:10.1109/pt.2018.2845672
- [56] SHAMS H, FICE M J, GONZALEZ-GUERRE-RO L, et al. Sub-THz Wireless over Fiber for Frequency Band 220–280 GHz[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(20): 4786–4793. DOI:10.1109/jlt.2016.2558450

## 作者简介



**邹喜华**, 西南交通大学教授; 主要研究领域为微波光子学、集成光子学等; 先后主持和参加基金项目20余项, 获得近10项科研奖励与荣誉, 已发表SCI/EI检索论文100余篇。



**李沛轩**, 西南交通大学副教授; 主要研究领域为微波光子学、光与无线融合; 先后参加基金项目10余项; 已发表论文10余篇, 其中被SCI/EI检索14篇。



**刘丰玮**, 西南交通大学硕士研究生; 主要研究领域为微波光子学与光与无线融合。



# 自动锁模光纤激光器 研究进展

## Research Progress of Automatic Mode-Locking Fiber Laser



义理林 /YI Lilin, 张力 /ZHANG Li, 蒲国庆 /PU Guoqing

(上海交通大学, 上海 200240)  
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**摘要:** 为解决基于非线性偏振旋转 (NPR) 的被动锁模光纤激光器 (MLFL) 抗环境干扰能力差和偏振难调等问题, 基于不同算法和硬件的自动 MLFL 相继被提出并取得重大突破。其中, 简单的遍历算法在自动锁模方案验证方面应用广泛, 机器学习算法在仿真层面可以实现高效的自动锁模, 最优化算法因其能进行高效的目标搜索而成为自动锁模的研究最热点。

**关键词:** 自动锁模; MLFL; NPR

**Abstract:** To solve the problems of poor environmental disturbances resistance and difficult polarization adjustment of passive mode-locked fiber lasers (MLFL) based on nonlinear polarization rotation (NPR), automatic MLFL based on different algorithms and hardware have been proposed successively and made great breakthroughs. Among them, the simple traversal algorithm is widely used in the verification of automatic mode-locked schemes. Machine learning algorithms can achieve efficient automatic mode-locked in the simulation. The optimization algorithm has become the hotspot of research on automatic mode-locking due to its efficient target search.

**Keywords:** automatic mode-locking; MLFL; NPR

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200410.1050.002.html>

网络出版日期: 2020-04-10

收稿日期: 2020-02-19

一直以来, 超短脉冲因为其峰值功率高、脉宽窄和连续光谱宽等特点而被广泛应用于各个领域, 如光学频率测量<sup>[1]</sup>、高分辨率原子钟<sup>[2]</sup>、信号处理<sup>[3]</sup>以及测距<sup>[4]</sup>等。被动锁模光纤激光器 (MLFL) 作为产生飞秒脉冲的主要手段, 是目前光电子技术领域最前沿、最活跃的研究方向之一。在众多实现锁模的方式中, 基于非线性偏振旋转 (NPR) 的被动锁模方式

因其结构简单和输出脉宽窄而被广泛研究; 然而, NPR 锁模中的偏振控制始终是一个难题, 尤其是想要获得谐波锁模 (HML) 和调 Q 锁模 (QML) 等多种输出状态时, 对偏振控制的精准性要求大幅上升。首先, 传统的手调偏振的方式往往非常耗时而且很难找到基频锁模 (FML) 之外的脉冲状态。其次, 环境的扰动 (如温度和压力变化) 会导致基于 NPR 的 MLFL 腔内的偏振态发生漂移从而导致激光器频繁失锁 (失去脉冲状态), 失锁后激光器输

出中的不稳定的调 Q (QS) 巨脉冲极有可能损坏后端级联的器件和设备从而造成损失。因此, 对拥有自动锁模能力和失锁恢复能力的自动 MLFL 的需求与日俱增。

自动锁模通常指的是利用计算机中央处理器、单片机或者现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 等高速计算设备控制锁模谐振腔中的电控器件来代替人在锁模调节过程中的作用。它利用算法来自动识别激光器的脉冲状态, 然后反馈控制谐振腔中的电控器件,

基金项目: 国家自然科学基金 (61575122)



从而能够自动锁定在目标状态。在过去的 10 年中,自动锁模在算法方面取得了重大突破,使得锁模时间、失锁恢复时间以及识别脉冲状态种类等方面都有了飞速进步。本文中,我们根据算法来分类,介绍了自动锁模技术的发展历程,并对各个成果的特点做了简要分析。

## 1 基于遍历算法的自动锁模技术

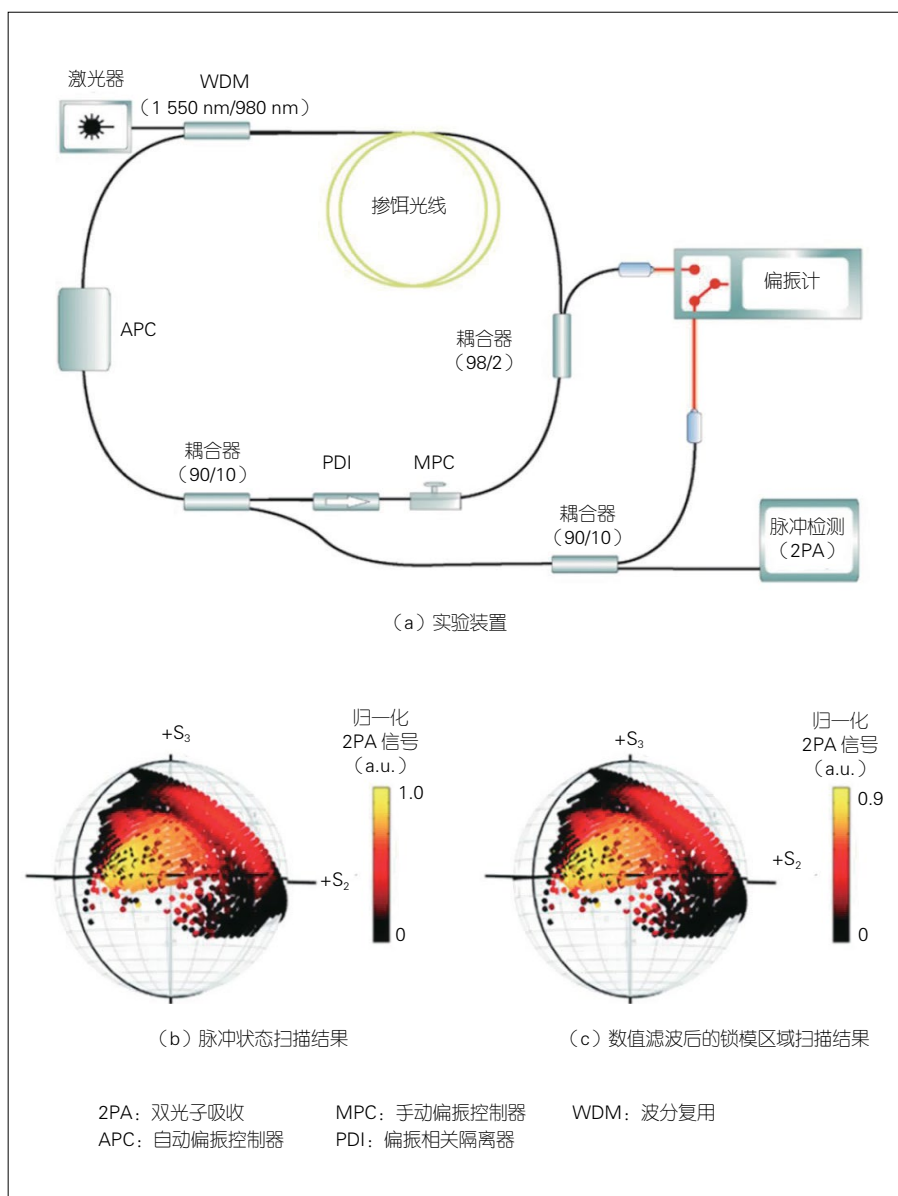
遍历算法因其简单性在早期已广泛应用于自动锁模,还因其能遍历所有偏振态,所以适合用来验证一些方案,同时也非常适用于观察偏振态与锁模状态之间的相互关系。近年来,基于遍历算法的自动锁模技术取得了很多不错的成果<sup>[5-12]</sup>。

2010 年, T. HELLWIG 等首次演示了自动锁模技术<sup>[5]</sup>。自动锁模技术的实验装置如图 1(a) 所示,他们在激光腔内加入基于压电挤压器的自动偏振控制器 (APC), 并使用自制的全光纤振幅分割偏振计来测量腔内偏振态,成功地表征了基于 NPR 的掺 Yb MLFL。其中,使用硅光电二极管来检测双光子吸收信号来判断锁模状态,因为只有超短脉冲的高峰值功率才会导致较强的双光子吸收 (2PA)。通过计算机自动控制 APC 来进行偏振扫描,就可以对激光器进行表征,即在偏振态和激光器的系统参数 (包括脉冲持续时间、中心波长和平均输出功率等) 之间建立映射。庞加莱球上的自动偏振扫描结果如图 1(b) 所示,其中处于脉冲状态的偏振态区域具有较强的 2PA 信号值;但这里的脉冲状态还包含 QS 状态和混合状态 (如 QML 状态)。如图 1(c) 所示,通过在扫描结果上应用数值滤波器,可以得到锁模状态对应的偏振态区域。该工作可以帮助基于 NPR 的 MLFL 快速找到锁模状态。但当已建立的映射长时间未更新时,

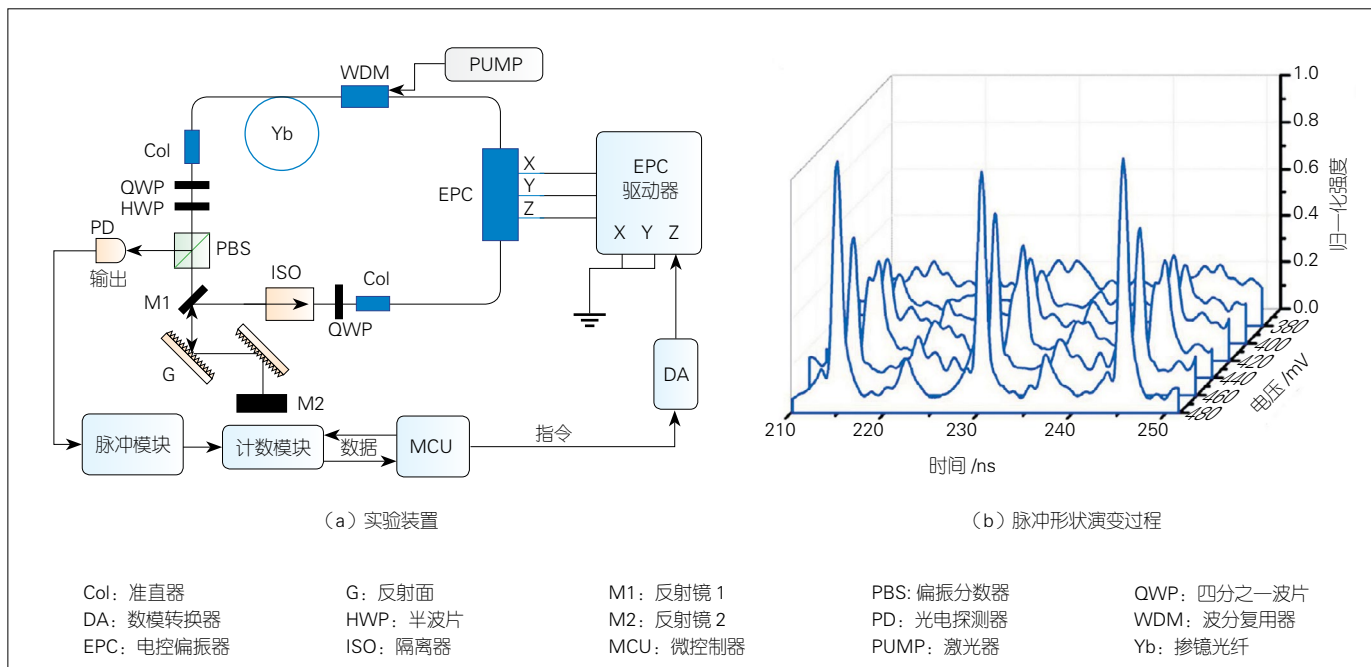
它可能无法在短时间内找到锁模状态;因此,随时间变化的腔状态仍然是不能忽略的挑战。

2012 年,华东师范大学的曾和平教授团队率先利用遍历算法和脉冲计数实现了基于 NPR 的掺 Yb 自动 MLFL<sup>[6]</sup>。该实验装置如图 2(a) 所示,其中偏振分束器 (PBS) 作为输出耦合器将谐振腔中的部分光输出到腔外来进行检测,然后通过光电探测器 (PD) 变为电信号之后进入脉冲整形模块变

成数字信号,接着再用一个高速计数模块进行脉冲计数并将计数的结果传递给微控制单元 (MCU)。MCU 根据计数的结果来判定当前是否为锁模状态,若不是,则遍历电控偏振控制器 (EPC) 的控制电压,直到找到锁模状态为止。这里使用的 EPC 是一个包含 3 个互为 45° 的集成光纤挤压器,但实验中为了方便起见仅使用了其中一个,这能够大大减少遍历算法的时间。由于单一控制电压实现的偏振状



▲图 1 基于非线性偏振旋转的锁模光纤激光器的自动化特征和校准实验成果



▲图2 基于非线性偏振旋转的掺Yb锁模自动控制实验成果<sup>[6]</sup>

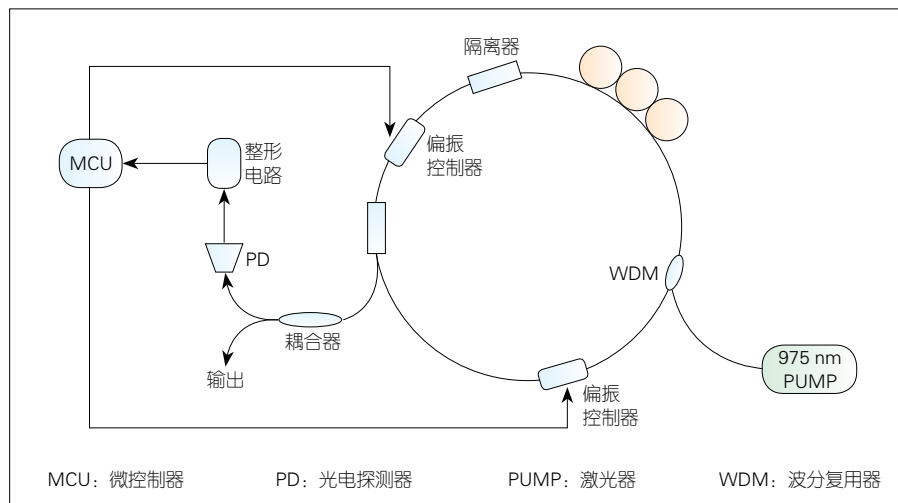
态有限,不能确保每次遍历都能找到锁模状态。为了实现高信噪比,实验中通过调节两个腔内衍射光栅之间的距离,将光纤激光器腔内的色散优化为接近零。图2(b)为基于此方案实现的自动MLFL从自由运行到锁模状态的时域波形演变过程。这项工作还研究了改变EPC的驱动电压时,激光器的脉冲宽度、光谱形状和载波包络相位偏移频率的变化过程。此外,在保持系统光路稳定的情况下,可以通过MCU来直接设置一个准确的电压值驱动EPC来复现锁模状态。该工作首次将反馈方案引入自动锁模领域,因此它无疑对自动锁模技术的发展产生了巨大的影响;但是,如果EPC电压遍历完后仍然没有找到锁模状态,这时候仍需通过腔内的波片进行手动偏振控制来改变腔内的初始偏振态,这就大大限制了该激光器的应用。

2014年,中国科学技术大学李莎等利用MSP430型单片机、两个电磁铁偏振控制器以及数模转换器(DAC)

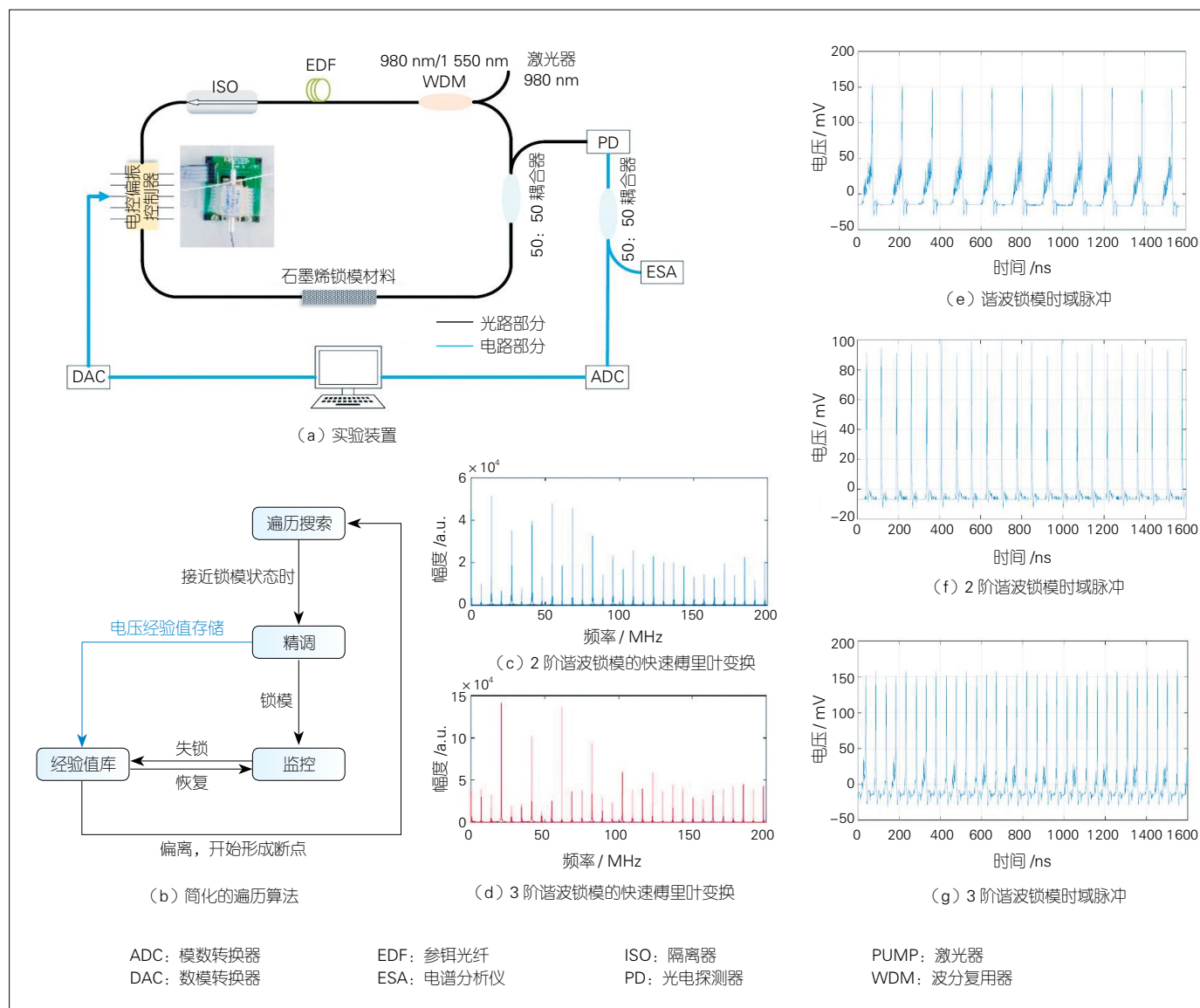
等器件实现了重复频率为6.238 MHz的自动MLFL<sup>[8]</sup>。实验装置如图3所示,工作原理与先前的工作类似,MCU运行遍历算法以搜索锁模状态,并且锁模状态的识别基于脉冲整形后的脉冲计数。基于此方案,激光器可以在90 s内自动进入锁模状态(即初始锁定时间)。该工作在初始锁模时间上取得了很大的进展,但在算法和硬件上仍然有很大的提升空间。工程应用中需要多种脉冲状

态,而该激光器只能搜索FML,在对脉冲计数规则进行修订后可能能够搜索到HML状态;但是对于QS和QML状态则难以实现。

2018年,我们课题组实现了能够自动识别多种脉冲状态的自动MLFL,包括FML、2阶HML和3阶HML等状态<sup>[11]</sup>。通过记录经验值,激光器可以在这些脉冲状态之间迅速切换。实验设置如图4(a)所示,我



▲图3 被动锁模光纤激光器的自动锁模系统实验装置



▲图4 可编程、可快速切换的被动谐波锁模光纤激光器实验成果

们使用模数转换器（ADC）代替复杂的脉冲整形电路，从而简化了系统的反馈装置，并使用计算机作为控制中心。如图4（b）所示，我们提出了一种简化的遍历算法来搜索巨大的偏振空间（通过4个DC电压控制EPC从而形成4维参数空间）。在搜索过程中，我们建立了一个快捷库来记录各个脉冲状态的经验驱动电压值，从而迅速进行初始锁模、失锁恢复以及脉冲之间的切换。这里，FML状态的搜索仍然基于脉冲计数，而HML则是

基于新的鉴别标准。通过对HML状态的时域脉冲进行快速傅里叶变换（FFT），我们发现对于 $n$ 阶HML状态，第 $n$ 个频谱分量的幅度在所有频谱线中最大，如图4（c）和图4（d）所示；因此，在脉冲计数的同时，将该频谱特征也作为鉴别标准是非常有效的。该工作实现的MLFL重复频率约为6.85 MHz，自动搜索到的各个脉冲波形如图4（e）—（g）所示。该工作中虽然是离线实现的自动锁模，但是提出的多状态鉴别算法是非常有效的。

## 2 基于机器学习算法的自动锁模技术

机器学习作为目前最热门的技术之一，也被应用于自动锁模领域<sup>[13-16]</sup>。这方面的研究主要是由华盛顿大学的J. N. KUTZ团队推动的。

2013年，该团队演示了数值仿真，通过极值搜索控制（ESC）算法在基于NPR的MLFL数值模型中搜索并保持高能量FML状态<sup>[13]</sup>。ESC是一种自适应控制算法，它可以通过梯度探测找到并跟踪目标函数的局部最大值。



然后,他们使用机器学习和稀疏表示法在数值仿真中成功地将 MLFL 中的双折射分类。2014 年,他们结合 ESC 和基于机器学习的双折射分类,提出了基于数值仿真的自调谐光纤激光器,如图 5 所示<sup>[15]</sup>。在训练过程中,使用环形搜索、Gabor 变换和奇异值分解(SVD)归约建立了一个库,该库包括各种腔体双折射值与波片和偏振器上的驱动电压的最优解之间的映射。在执行过程中,激光腔内当前的双折射用短环形搜索来表征,并用稀疏表示法来分类,然后由库给出最优解。ESC 的作用是解决环境干扰带来的微小性能变化。如果环境干扰太大而导致应用优化方案后激光器依然不能回到期望状态,则该算法将返回并执行另一个短环形搜索来重新通过稀疏分类识别双折射。

最近,他们通过将深度学习结构与基于数值仿真的模型预测控制结合,发表了自调谐激光器的最新结果<sup>[16]</sup>。未来随着计算能力的发展,使用适当的机器学习算法来实现自动锁模可能

会非常高效;但目前这些研究都还是基于数值仿真的。尽管仿真中有很好的理论指导数据生成,但在实际中能否发挥出好的效果还有待验证。

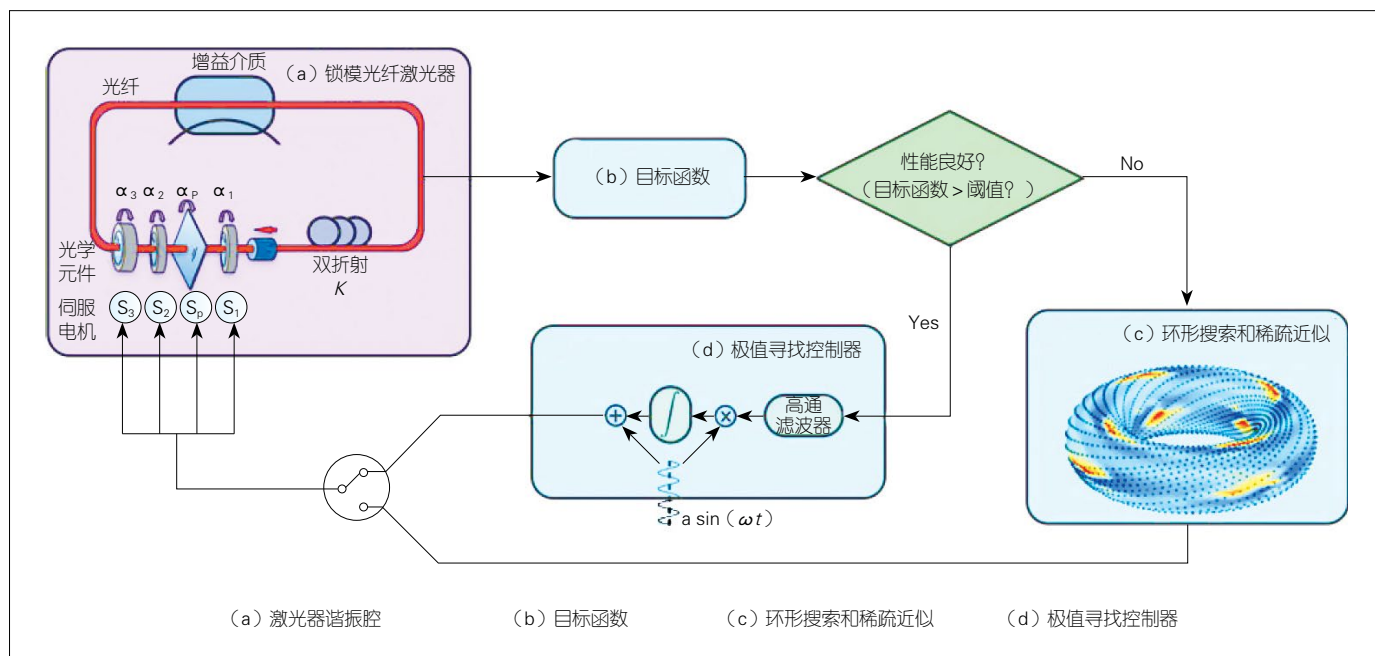
### 3 基于最优化算法的自动锁模技术

优化算法因能够高效地在短时间内找到锁模目标,成为目前自动锁模领域的研究最热点,取得了非常不错的研究成果<sup>[17-25]</sup>。

2013 年, FU X. 等使用基因算法(GA)来优化多个 NPR 滤波器,从而在理论仿真中增强了 MLFL 的单脉冲能量<sup>[17]</sup>。仿真表明,通过使用 GA 恰当地设置多个 NPR 滤波器,可以有效地增强单脉冲能量,从而可以规避和抑制多脉冲不稳定性。这也是 GA 首次被应用与自动锁模技术中。

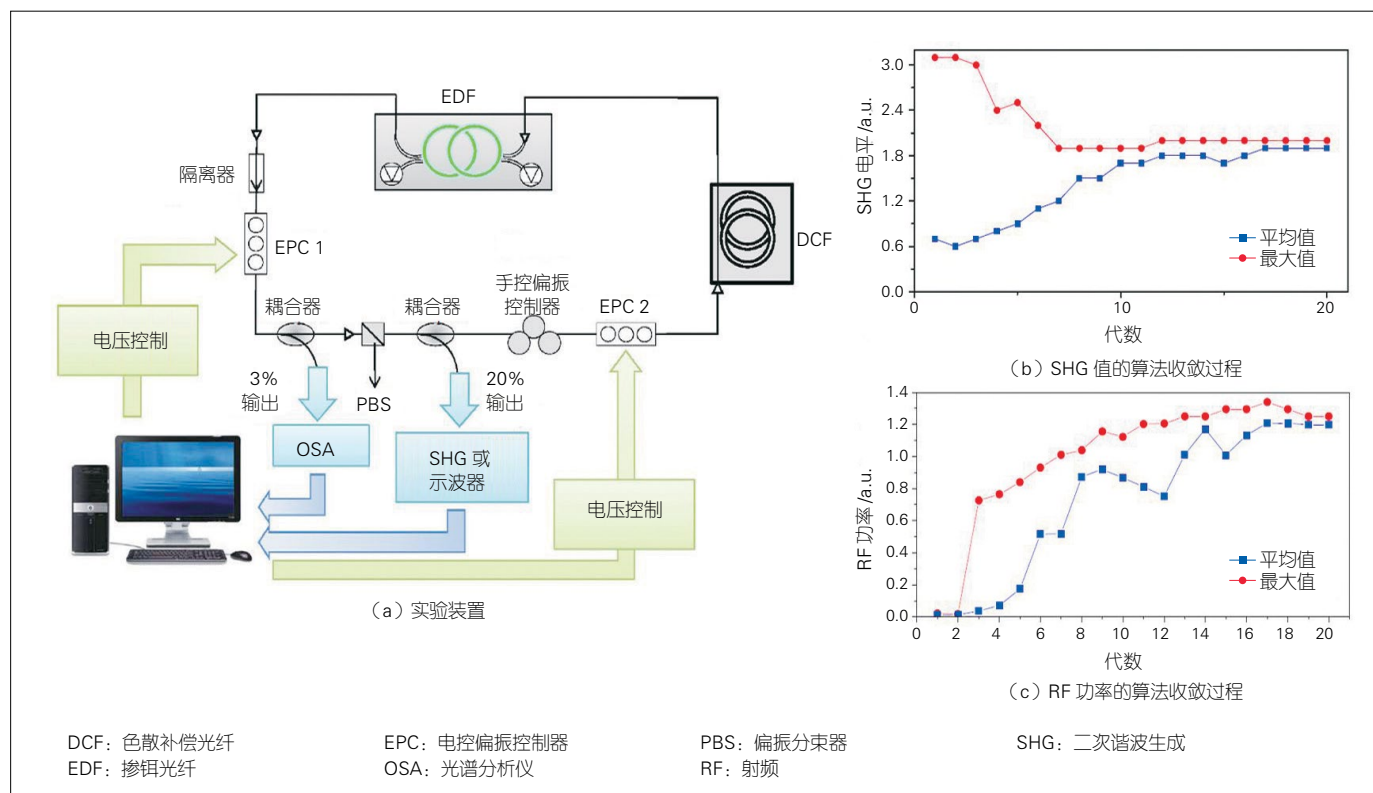
2015 年,法国勃艮第大学的 U. ANDRAL 等首次利用演化算法(EA)来进行自动锁模的实验演示<sup>[18]</sup>。实验装置如图 6(a)所示,2 个 EPC 和 1 个手调偏振控制器用于控制谐振腔内的偏振态。其中,每个 EPC 由 3 个

电压驱动,而 EA 优化这 6 个电压值来实现自动锁模。首先,他们提出的适应度函数是非线性  $\text{BaB}_2\text{O}_4$  晶体中产生的二次谐波生成(SHG)信号。由于 FML 状态可以产生很强的 SHG 信号,所以持续优化 EPC 的 6 个驱动电压来放大 SHG 信号,最终可以达到锁模状态,如图 6(b)所示。然而,将 SHG 信号的强度作为适应度函数无法很好地区分 FML 状态和 QML 状态。由于 QML 状态可能会出现在 EA 优化的过程中,为了解决这个问题,该工作中使用自由空间范围(FSR)射频(RF)频谱分量的强度作为新的适应度函数,来过滤掉 QML 状态,其算法收敛效果如图 6(c)所示。随后,该组又使用新的适应度函数实现了自动锁定到 FML 状态和 HML 状态<sup>[19]</sup>。这些研究具有重要意义,但仍存在一些不足,如无法实现腔体内的整个偏振控制,这可能会使操作更加复杂。EA 的复杂性和巨大的 6 维偏振搜索空间,导致初始锁模时间太长(EA 收敛需要 12 代,大约为半小时)。



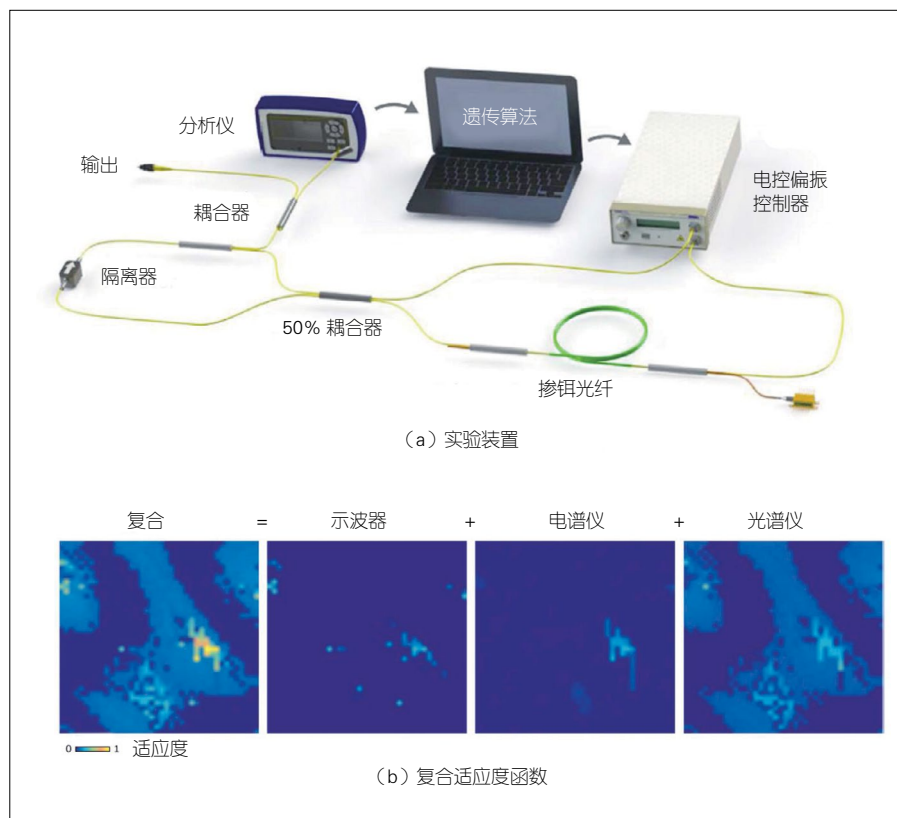
▲图 5 自调谐光纤激光器实验成果





▲图 6 基于演化算法的锁模光纤激光器实验成果

2016 年, 英国帝国理工学院 R. I. WOODWARD 等使用 GA 来优化 EPC 的驱动电压实现了自动锁模, 其实验装置如图 7 (a) 所示<sup>[20]</sup>。该工作创造性地提出了复合适应度函数, 它是从时域波形、光谱和频谱中提取的 3 个分量的平均加权总和。通过扫描 EPC 的驱动电压, 得到了它们之间的关系, 如图 7 (b) 所示。该工作验证了 GA 在优化复合适应度上是非常有效的, 且 4 次连续 FML 状态搜索结果显示了该激光器良好的可重复性。此外, 由于激光器在 GA 迭代的过程中受到干扰后依然能恢复到 FML 状态, 所以该自动 MLFL 还具有抗环境干扰的能力。该工作进一步为在自动锁模技术中使用 GA 铺平了道路, 但复合适应度函数的参数需要使用示波器、光谱分析仪和电谱分析仪等大型设备来收集; 因此, 激光器的成本和便携性是面临的主要问题。此外, 由于使用大型设备



▲图 7 基于基因算法的超短脉冲自优化实验成果<sup>[20]</sup>

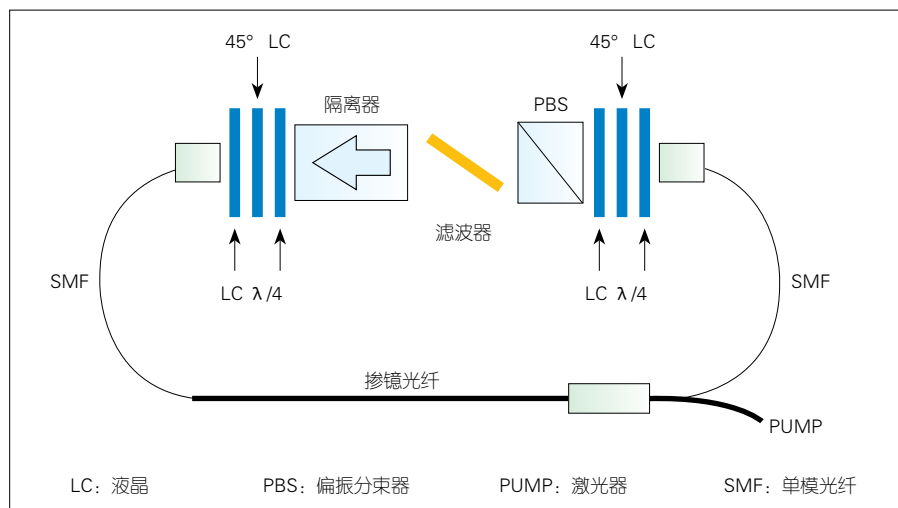
进行的数据采集时设备之间的数据交互很耗时,而且该工作中使用的GA的复杂性,初始锁模时间约为30 min。

2017年,美国科罗拉多大学的D. G. WINTERS等利用GA实现了全正常色散光纤激光器的自动锁模,同时利用爬山算法进行失锁恢复<sup>[22]</sup>。实验装置如图8所示,他们使用4个液晶(LC)相位延迟片来代替传统基于NPR的MLFL中的可旋转的固定延迟片,LC只需要较低的电压进行驱动;因此,偏振的参数空间是4维的。GA的适应度函数是测得的光谱和目标光谱之间的确定系数,它揭示了这两个光谱之间的光谱相似性。基于有效的适应度函数可以迅速找到锁模状态,同时该工作使用爬山算法来进行失锁恢复。通过这些处理,输出脉宽的稳定性大

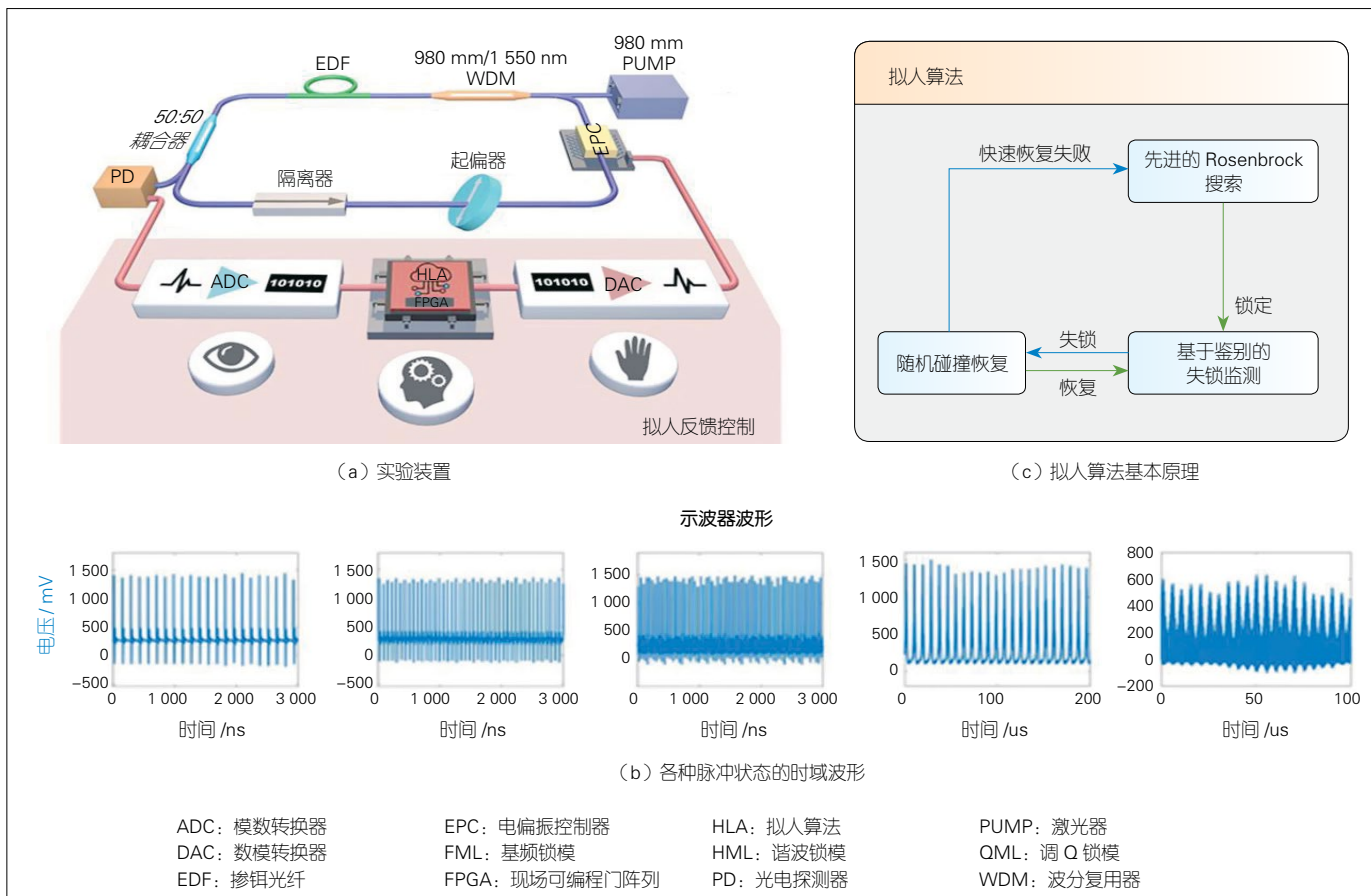
大提升。该工作最终通过GA在人口数量为50时运行9代后能够成功找到FML状态,大约耗时90 s。并且基于爬山算法,激光器可以在30 s内从失

锁成功恢复。

2019年,我们实现了第一个实时智能可编程MLFL,实验装置如图9(a)所示<sup>[24]</sup>。该激光器能够自动锁定



▲图8 全正常色散自动锁模光纤激光器实验装置<sup>[22]</sup>



▲图9 基于拟人算法的智能锁模光纤激光器实验成果<sup>[24]</sup>

各种脉冲状态, 包括 FML 状态、2 阶 HML 状态、3 阶 HML 状态、QS 状态和 QML 状态, 如图 9 (b) 所示。此外, 该激光器大大地缩短了 FML 状态的初始锁模时间和失锁恢复时间, 其中最短的启动仅为 0.22 s, 而最短的恢复时间仅为 14.8 ms。通过 10 次连续实验, 我们得到平均初始锁模时间为 3.1 s, 平均失锁恢复时间为 58.9 ms。此外, 我们在开放的实验环境中进行了 15 天的运行测试, 验证了激光器优秀的稳定性。这些优秀的性能主要归因于我们的实时偏振控制硬件平台和所提出的拟人算法 (HLM)。激光器最初在约 0.5 s 内达到 FML 状态, 然后在 15 天内发生了 12 次失锁, 平均恢复时间仅为 31 ms, 这也表明激光器优秀的稳定性。这些优秀的性能仍归因于我们的实时偏振控制硬件平台和所提出的 HLM。如图 9 (a) 所示, 硬件平台由 ADC、FPGA、DAC 和 EPC 组成。与离线实现 (大型设备用于数据采集, 而 PC 作为计算中心) 相比, 实时实现在耗时上有明显的优势。如图 9 (c) 所示, HLM 主要由 3 部分组成: 先进的 Rosenbrock 搜索 (ARS) 算法、随机碰撞恢复算法以及锁模鉴别算法。HLM 从 ARS 开始, 被用来搜索目标脉冲状态。在锁定到目标脉冲状态后, HLM 将进入基于鉴别的监测中 (除非检测到失锁)。随机碰撞恢复试图能够高效地将激光从失锁中恢复。如果恢复成功, 则 HLM 将返回监测过程, 否则重新启动 ARS。该算法称为拟人算法是因为它有许多和手动锁模过程中人的逻辑相似的功能, 而 ARS 在某种程度上类似于偏振调整中的人为行为。此外, 我们提出了一套有效的目标函数和鉴别标准, 可以实现各种脉冲状态的自动搜索。通过将实时实现与拟人算法相结合, 我们成功解决了自动锁模领域中的一些持久性缺陷问

题, 包括耗时长以及由于使用大型设备而导致的便携性不足、高成本等问题。此外, 可编程的各种模式输出提高了激光器的灵活性, 使其在研究和工业应用中都具有广阔的前景。随后的工作中, 我们基于 FPGA 控制平台改进了 GA 算法, 提出了基于 FFT 特征的新的适应度函数, 进一步缩短了锁模时间<sup>[25]</sup>。

为了提高自动 MLFL 的智能水平, 应该监测和控制更多的反馈信号。除了时域波形和频谱外, 还可以通过将光谱信息加入到反馈信号中来进行一定程度的光谱控制<sup>[20-22]</sup>。目前使用光谱分析仪来进行光谱信息采集的方法速度比较慢, 无法实现实时自动锁模。最近, 我们课题组将时间拉伸技术引入到实时智能 MLFL, 实现了锁模飞秒脉冲的实时智能控制, 实验装置如图 10 (a) 所示<sup>[26]</sup>。时间拉伸技术通过色散介质将光谱映射成为时域波形, 使得我们可以实时采集和分析光谱信息。结合智能控制算法, 实现了锁模光谱宽度 10 ~ 40 nm 可调, 调节精度为 1.47 nm, 如图 10 (b) 所

示, 并且实现了光谱形状可编程为双曲正割或三角形, 如图 10 (c) 所示。此外, 基于实时的光谱控制, 我们的研究还展示了从窄谱锁模态到宽谱锁模态以及从三角形光谱脉冲态到宽谱锁模态的演变过程, 发现两者动力学过程具有相似性, 提出了目标锁模状态可能决定中间动力学过程的猜想, 为人们进一步探索 MLFL 内部机理提供新视角。

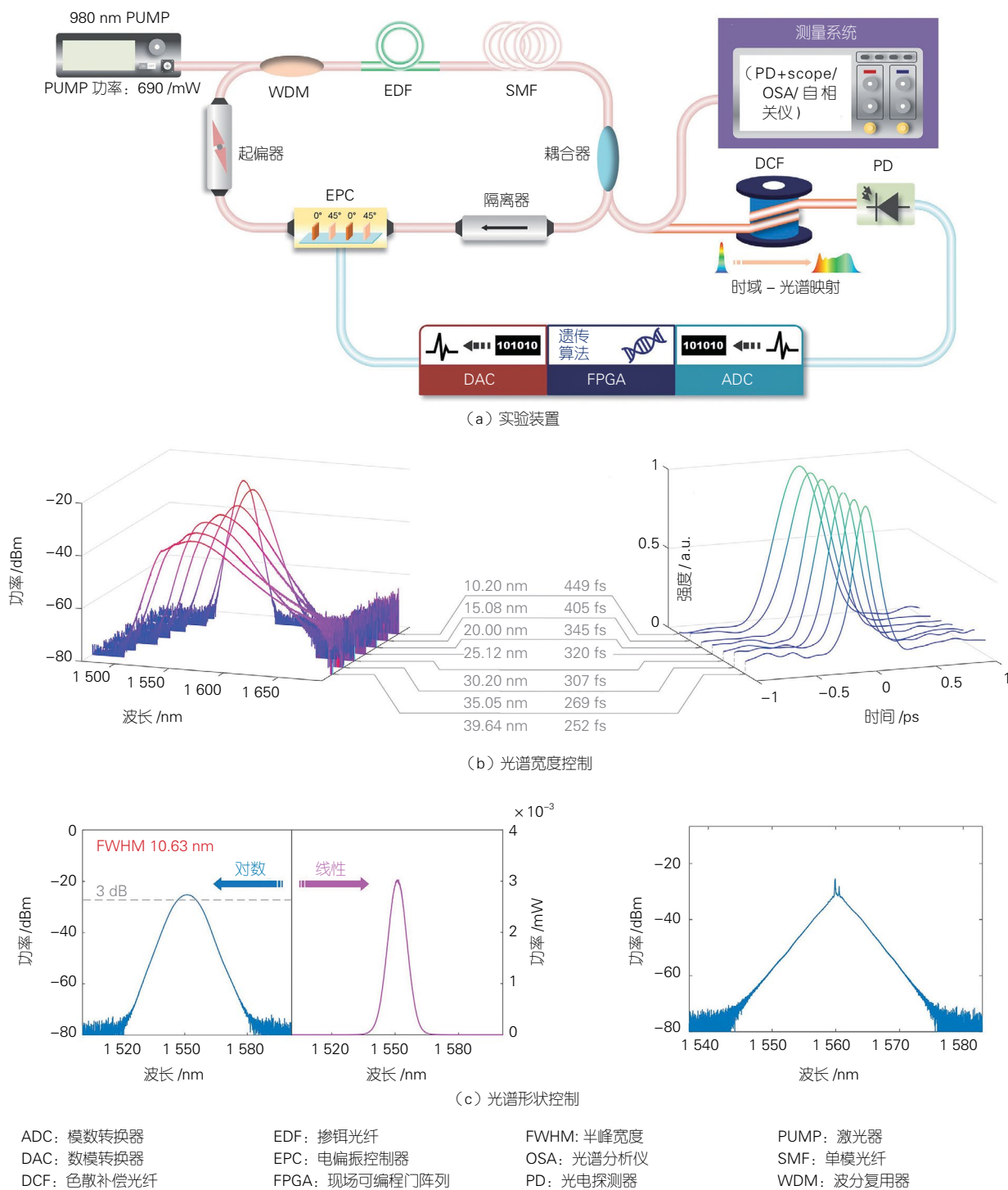
表 1 从算法、锁模时间、恢复时间以及主要特点等方面总结了上述自动锁模相关研究的成果。遍历算法因其简单性作为早期自动锁模的探索性工作, 机器学习因其出色的模型优化能力在自动锁模的仿真中表现出色; 而最优化算法因其高效性能能够大大降低锁模时间, 但其中目标函数的选择也是算法性能的关键。

## 4 结束语

自动锁模技术解决了传统基于 NPR 的 MLFL 中的手动偏振调节耗时长和不稳定等难题, 在锁模时间、失锁恢复时间以及识别脉冲状态数目等方面

▼ 表 1 自动锁模激光器工作的比较

研究单位	算法	锁模时间	恢复时间	主要特点
明斯特大学	遍历算法	-	-	首个自动锁模, 建立偏振态和锁模态的映射帮助快速找到锁模态
华东师范大学	遍历算法	-	-	实时锁模, 首次使用脉冲计数, 但控制参数少而导致不稳定
中国科学技术大学	遍历算法	90 s	-	实时锁模, 脉冲计数; 锁模时间上取得重要进展
上海交通大学	遍历算法	-	-	高效的多状态鉴别算法, 识别锁模状态数目多
华盛顿大学	机器学习	-	-	性能优秀但目前仅限于仿真
勃艮第大学	演化算法	30 min	-	首次最优化算法进行实验演示, 但搜索空间太大
帝国理工学院	遗传算法	30 min	-	提出复合适应度函数, 受限于设备之间数据交互
科罗拉多大学	遗传算法	90 s	30 s	进行了失锁恢复, 在锁模和恢复时间上表现优秀
上海交通大学	类人算法	0.22 s	14.8 ms	类人算法的高效, 锁模及恢复时间极短, 识别脉冲种类多
上海交通大学	遗传算法	-	-	首个锁模光谱智能控制



▲ 图 10 基于时间拉伸技术的锁模飞秒脉冲智能控制的实验成果<sup>[26]</sup>

都取得了非常好的研究进展。这些成果在学术界和工业界都有极大的应用潜力，未来还可以通过升级硬件和优化算

法来进一步提升这些指标。但是自动锁模未来的发展不仅仅局限于此，结合时间拉伸色散傅里叶变换来实时控制锁

模脉冲光谱就是一个重要的研究趋势而且已经取得了突破性的进展<sup>[26]</sup>。目前，采用智能锁模技术可实现对飞秒激



光器输出脉冲光谱形状的智能调控;但调控参数仅限于偏振态,对光谱的调控能力有限。未来可以进一步将泵浦功率和锁模谐振腔长度引入反馈控制信号。同时,由于实时光谱分辨率有限,还无法实现某些特殊形状的锁模光谱。此外,目前尚未实现飞秒脉冲时域相位以及脉冲宽度的实时精确识别,在飞秒脉冲时域精确调控方面还需加大研究力度。而通过飞秒脉冲的空间相位控制实现飞秒脉冲光场的空域精确调控还是研究空白;因此,时频空多维度精细调控飞秒超快激光是未来的重要发展趋势。

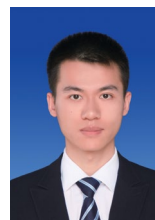
#### 参考文献

- [1] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T W. Optical Frequency Metrology[J]. Nature, 2002, 416(6877): 233–237. DOI:10.1038/416233a
- [2] NEMITZ N, OHKUBO T, TAKAMOTO M, et al. Frequency Ratio of Yb and Sr Clocks with  $5 \times 10^{-17}$  Uncertainty at 150 Seconds Averaging Time[J]. Nature Photonics, 2016, 10(4): 258–261. DOI:10.1038/nphoton.2016.20
- [3] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A Fully Photonics-Based Coherent Radar System[J]. Nature, 2014, 507(7492): 341–345. DOI:10.1038/nature13078
- [4] LEE J, KIM Y J, LEE K, et al. Time-of-Flight Measurement with Femtosecond Light Pulses[J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 716–720. DOI:10.1038/nphoton.2010.175
- [5] HELLWIG T, WALBAUM T, GROß P, et al. Automated Characterization and Alignment of Passively Mode-Locked Fiber Lasers Based on Nonlinear Polarization Rotation[J]. Applied Physics B, 2010, 101(3): 565–570
- [6] SHEN X L, LI W X, YAN M, et al. Electronic Control of Nonlinear-Polarization-Rotation Mode Locking in Yb-Doped Fiber Lasers[J]. Optics Letters, 2012, 37(16): 3426–3428. DOI:10.1364/ol.37.003426
- [7] RADNATAROV D, KHRIPUNOV S, KOBTSEV S, et al. Automatic Electronic-Controlled Mode Locking Self-Start in Fibre Lasers with Non-Linear Polarisation Evolution[J]. Optics Express, 2013, 21(18): 20626–20631. DOI:10.1364/oe.21.020626
- [8] LI S, XU J, CHEN G, et al. An Automatic Mode-Locked System for Passively Mode-Locked Fiber Laser[C]//2013 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Devices and Optical Signal Processing. International Society for Optics and Photonics. Beijing, China: SPIE, 2013. DOI: 10.1117/12.2037523
- [9] OLIVIER M, GAGNON M D, PICHÉ M. Automated Mode Locking in Nonlinear Polarization Rotation Fiber Lasers by Detection of a Discontinuous Jump in the Polarization State[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6738–6746. DOI:10.1364/oe.23.006738
- [10] SHEN X L, HAO Q, ZENG H P. Self-Tuning Mode-Locked Fiber Lasers Based on Prior Collection of Polarization Settings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(20): 1719–1722. DOI:10.1109/pt.2017.2746818
- [11] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Programmable and Fast-Switchable Passively Harmonic Mode-Locking Fiber Laser[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition. CA. San Diego, California, Washington, D.C.: OSA, 2018. DOI: 10.1364/OFC.2018.W2A.9
- [12] WU H, HUANG P, TENG Y, et al. Automatic Generation of Noise-Like or Mode-Locked Pulses in an Ytterbium-Doped Fiber Laser by Using Two-Photon-Induced Current for Feedback[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 1–8
- [13] BRUNTON S L, FU X, KUTZ J N. Extremum-Seeking Control of a Mode-Locked Laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013, 49(10): 852–861. DOI:10.1109/jqe.2013.2280181
- [14] FU X, BRUNTON S L, KUTZ J N. Classification of Birefringence in Mode-Locked Fiber Lasers Using Machine Learning and Sparse Representation[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8585–8597. DOI:10.1364/oe.22.008585
- [15] BRUNTON S L, FU X, KUTZ J N. Self-Tuning Fiber Lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 464–471. DOI:10.1109/jstqe.2014.2336538
- [16] BAUMEISTER T, BRUNTON S L, KUTZ J N. Deep Learning and Model Predictive Control for Self-Tuning Mode-Locked Lasers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(3): 617–626. DOI:10.1364/josab.35.000617
- [17] FU X, KUTZ J N. High-Energy Mode-Locked Fiber Lasers Using Multiple Transmission Filters and a Genetic Algorithm[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6526–6537. DOI:10.1364/oe.21.006526
- [18] ANDRAL U, SI FODIL R, AMRANI F, et al. Fiber Laser Mode Locked through an Evolutionary Algorithm[J]. Optica, 2015, 2(4): 275–278. DOI:10.1364/optica.2.000275
- [19] ANDRAL U, BUGUET J, SI FODIL R, et al. Toward an Autotuning Mode-Locked Fiber Laser Cavity[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(5): 825–833. DOI:10.1364/josab.33.000825
- [20] WOODWARD R I, KELLEHER E J R. Towards 'smart Lasers': Self-Optimisation of an Ultrafast Pulse Source Using a Genetic Algorithm[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 37616. DOI:10.1038/srep37616
- [21] WOODWARD R I, KELLEHER E J R. Genetic Algorithm-Based Control of Birefringent Filtering for Self-Tuning, Self-Pulsing Fiber Lasers[J]. Optics Letters, 2017, 42(15): 2952–2955. DOI:10.1364/ol.42.002952
- [22] WINTERS D G, KIRCHNER M S, BACKUS S J, et al. Electronic Initiation and Optimization of Nonlinear Polarization Evolution Mode-Locking in a Fiber Laser[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33216–33225
- [23] RYSER M, BACHER C, LATT C, et al. Self-Optimizing Additive Pulse Mode-Locked Fiber Laser: Wavelength Tuning and Selective Operation in Continuous-Wave or Mode-Locked Regime[C]//Fiber Lasers XV: Technology and Systems. International Society for Optics and Photonics. CA, USA: SPIE, 2018. DOI: 10.1117/12.2290645
- [24] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Intelligent Programmable Mode-Locked Fiber Laser with a Human-Like Algorithm[J]. Optica, 2019, 6(3): 362–369. DOI:10.1364/optica.6.000362
- [25] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Genetic Algorithm-Based Fast Real-Time Automatic Mode-Locked Fiber Laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(1): 7–10. DOI:10.1109/pt.2019.2954806
- [26] PU G Q, YI L L, ZHANG L, et al. Intelligent Control of Mode-Locked Femtosecond Pulses by Time-Stretch-Assisted Real-Time Spectral Analysis[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9(1): 13. DOI:10.1038/s41377-020-0251-x

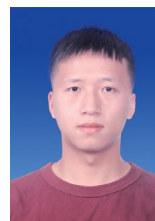
#### 作者简介



义理林, 上海交通大学教授、博士生导师; 主要研究领域为智能锁模激光器和智能光通信; 国家优秀青年科学基金/教育部“长江学者”青年项目获得者; 已发表论文 200 余篇, 其中被 SCI 检索 100 余篇。



张力, 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室在读硕士; 研究方向为智能锁模激光器; 发表 SCI 论文 4 篇。



蒲国庆, 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室在读博士; 研究方向为智能锁模激光器; 发表 SCI 论文 4 篇。

# 半导体智能视觉系统芯片

## Semiconductor Smart Vision System Chips



吴南健 /WU Nanjian<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院, 北京 100083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

(1. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**摘要:** 介绍半导体智能视觉系统芯片的研究背景、基本概念、体系架构的演变、设计案例及今后的发展方向。认为半导体智能视觉系统芯片是一种支持图像获取、计算视觉和深度学习融合处理的典型边缘计算型视觉系统芯片, 具备实现或超越人类视觉系统的功能及其性能的潜力, 在高速运动目标的实时追踪、图像识别、智能交通、虚拟现实、机器人、生产线自动产品质量检测及各类智能化玩具等领域具有广泛的应用前景。

**关键词:** 智能; 视觉系统芯片; 图像传感; 视觉处理器; 计算视觉; 深度学习

**Abstract:** The research background, the concept of system chip, the evolution of chip architecture, the design case of vision system chip and the future development direction are introduced. Smart vision system chip is a typical edge computing vision system chip that can perform image acquisition, computational vision and deep learning processing. It can mimic or exceed human vision system in its function and performance, and can be widely applied into real-time tracking of moving objects, image recognition, intelligent transportation, virtual reality, robot, automatic product quality detection of production lines and various intelligent toys.

**Keywords:** intelligence; vision system chip; image sensor; vision processor; computational vision; deep learning

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200409.1412.002.html>

网络出版日期: 2020-04-09

收稿日期: 2020-02-18

视觉是人类感知外部世界的最重要手段, 视觉信息占到了人类获取外部环境信息总量的 80%, 视觉感知和视觉信息的智能化处理是人类智能活动的重要组成部分。如图 1 所示的人类视觉信息系统主要包括人眼视网膜和大脑视觉皮层<sup>[1]</sup>, 它们分别起到

了视觉传感器和视觉图像信息多层次并行处理器的功能。视觉系统能够感知外部世界的可见光视觉信号, 并且通过学习记忆来识别和认知外部的视觉信息。随着信息社会的发展和人工智能产业的再度崛起, 人工视觉信息的获取和快速高精度处理在人工智能产业化中的作用日趋凸显, 如何借鉴人的视觉系统结构和视觉信息处理模式来实现人工的智能视觉系统是当今人工智能领域面临的重要挑战。在硅片上实现能够进行视觉信息获取和智

能化处理的半导体智能视觉系统芯片成为了当今半导体信息领域中重要的热点研究课题之一。

半导体智能视觉系统芯片是一种集成了视觉图像传感器和智能视觉图像处理器的新型超大规模光电混合集成电路芯片, 它是一种典型的边缘计算型视觉系统芯片。半导体智能视觉系统芯片克服了传统视觉图像系统中数据串行传输和串行信息处理的速度限制瓶颈效应, 具有实现或超越人类视觉系统的功能及其性能的潜力, 在

**基金项目:** 国家重大科学研究计划(2011CB932902)、国家 02 科技重大专项(2011ZX02505-004)、国家自然科学基金重点项目(61234003、61434004)

高速运动目标的实时追踪、图像识别、智能交通、虚拟现实、生产线自动产品质量检测及各类智能化玩具等领域具有广泛的应用前景。智能视觉系统芯片是一种新型光电子、微电子融合的混合集成电路，它的工作原理和设计方法不同于传统的图像传感器芯片。智能视觉系统芯片的设计和应用研究富有挑战性。

C. MEAD<sup>[2]</sup>和K. AIZAWA<sup>[3]</sup>首先提出了一种基于半导体集成电路技术的神经形态视觉芯片，它以单芯片的形式实现图像传感和图像处理的功能，是一种非常有应用潜力的人工视觉系统芯片。在近30年的发展进程中，美国、

欧洲和日本等国家或地区纷纷投入了大量资金和研究人员支持大规模视觉芯片的科学技术研究。随着互补金属氧化物半导体（CMOS）图像传感器技术、智能化图像信息处理方法和光电融合集成芯片技术的进步和研究人员不懈的努力，半导体智能视觉系统芯片的体系架构、信息处理模式和光电融合设计技术不断演化进步，取得了一系列重要的进展<sup>[4-12]</sup>。文章中，我们重点介绍和评述半导体智能视觉系统芯片体系架构的演变和最新研究成果。

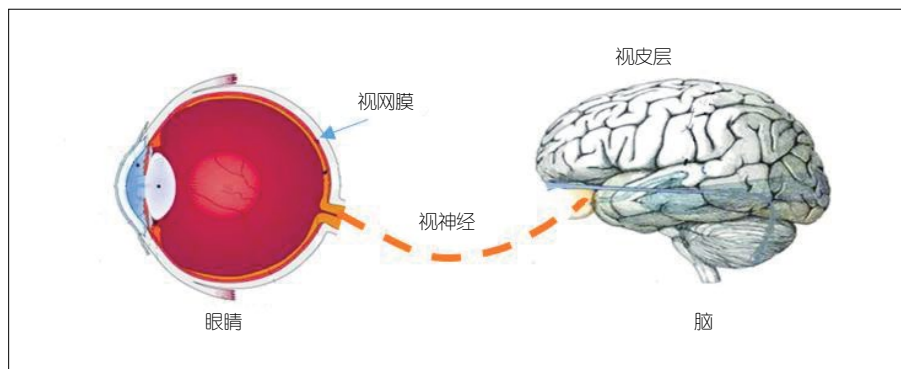
### 1 智能视觉系统芯片的概念

图2给出了智能视觉系统芯片的

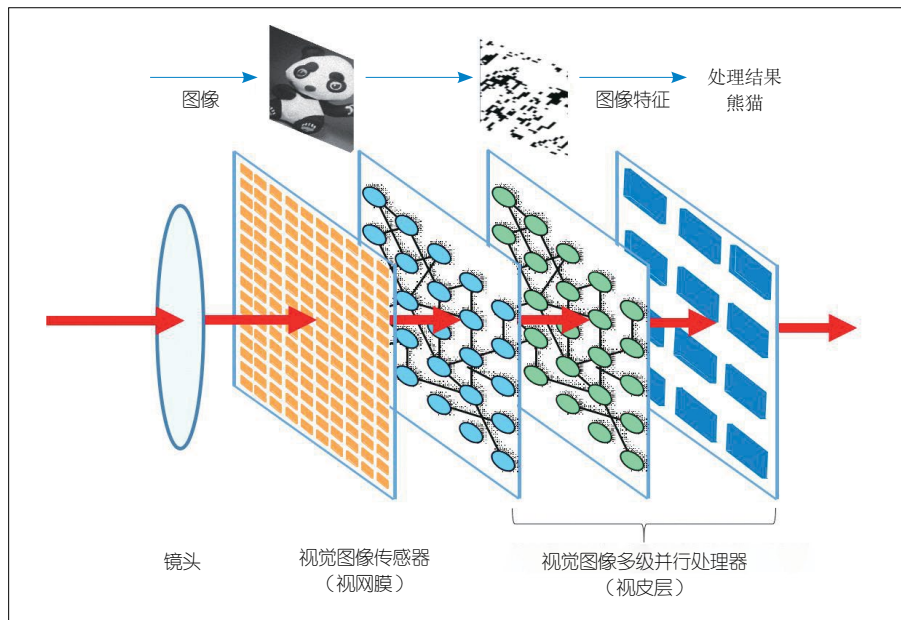
示意<sup>[1]</sup>，它由相当于视网膜的视觉图像传感器、相当于视皮层的多级并行处理网络和片上存储器组成。视觉图像传感器将捕获到的外界光学图像信号转换成电子图像信号，并进行图像信号的彩色处理、灰度调整、噪声消除和灵敏度控制等增强处理操作，然后电子图像信号传输给图像处理器进行多级图像信息并行处理。多级并行处理器接收来自视网膜的图像信号并进行图像信息处理，通过进行多层次视觉图像特征的提取和图像目标的检测，完成视觉信息的学习、记忆和识别功能。这种芯片的智能含义主要体现在两个方面：首先，芯片能够分析视觉图像传感器获得的图像质量，并判断图像是否能够满足后续信息处理的要求，然后优化传感器的拍摄条件进行图像获取；其次，芯片能够自动地对获取的图像进行智能化处理，实现图像信息的学习、记忆、识别分析和判断处理的功能。

目前的智能视觉系统芯片可分为两类：帧驱动型视觉系统芯片<sup>[4-9]</sup>和事件驱动型视觉芯片<sup>[10-12]</sup>。帧驱动型视觉系统芯片通过视觉图像传感器以帧的形式捕获图像，然后将图像数据传输到多级并行处理器中，多级并行处理器逐帧进行图像信息处理，最后输出处理结果。另一方面，事件驱动型视觉芯片感知场景中的时间或空间光信号变化进行动态视觉成像，输出脉冲视觉图像数据到多级并行处理网络中，然后脉冲型多级并行处理网络进行图像信息处理，最后输出处理结果。

这两类智能视觉系统芯片在设计方法、信号编码、操作模式和图像信息处理算法等方面有很大的不同。事件驱动型视觉芯片具有感知速度快、数据稀疏、类脑处理、能量利用率高等优点。其信号编码方式与人类视觉系统中的视觉信号编码方式相似，视



▲图1 人的视觉系统示意图



▲图2 智能视觉系统芯片的示意图



觉图像信息的表示、传输和处理都以脉冲形式来进行；因此，它具有时间分辨率高和视觉信息处理能效高的特点。但是，事件驱动型视觉信号时分处理困难，需要相对大规模的物理处理单元电路进行信息处理。

另一方面，帧驱动型视觉系统芯片在图像分辨率、静态目标检测、时间复用视觉图像信息处理、芯片面积等方面具有优势。在帧驱动型视觉系统芯片中像素电路紧凑，使得视觉图像传感器更加容易提高分辨率和填充因子。视觉图像传感器可以很好地感知静止和运动的目标，较好地支持视觉图像信息的时间复用处理模式和处理网络-存储器间的中间数据传输，方便地采用计算视觉和深度学习的方法进行视觉图像信息处理。由于篇幅的限制，本文中我们以帧驱动型视觉系统芯片为例，介绍智能视觉系统

芯片体系架构的演变和最新的研究成果。有关事件驱动型视觉芯片的研究内容细节可阅读文献 [1]、[10-12]。

## 2 智能视觉系统芯片体系架构

智能视觉系统芯片的概念提出后，各国研究人员开展了长期的视觉系统芯片研究。随着半导体视觉图像传感技术和图像信息处理技术的不断进步，智能视觉系统芯片的体系架构不断演进形成了如图 3 所示的 4 种不同架构，支撑着智能视觉系统芯片设计和技术的发展。智能视觉系统芯片主要包括视觉图像传感、图像增强处理、特征提取处理和图像检测识别处理的 4 个功能，能够完成智能化的图像感知和图像信息处理。早期的视觉系统芯片通常采用架构 I<sup>[5]</sup>，它由二维处理单元阵列组成，处理单元以单指令多数据方式进行图像获取和

信息处理操作。处理单元包括了光电二极管像素和图像信息处理电路，获取光电信号后处理电路就直接可以进行图像信息处理，可实现像素级的实时并行处理，具有工作速度高的特点。这种视觉系统芯片能完成图像信号增强处理、边缘检测、轮廓提取、块匹配、图像质心、光流计算、运动检测、测距和图像压缩等图像处理操作，可应用于目标跟踪、产品检测和人机交互等领域；然而，由于这种架构的芯片存在图像分辨率低、填充因子小和图像信息处理功能有限等缺点，实际应用推广困难。

为了克服这些困难，新的视觉系统芯片体系架构 II 被提出<sup>[6]</sup>。该芯片由图像传感器、二维处理单元阵列、行并行处理器阵列和微处理器单元构成，它们可以分别执行视觉图像传感、图像增强、特征信息提取和图像识别

功能	图像获取	图像增强	特征提取	图像识别	优缺点
处理方式	二维图像 $O(N \times N)$	原始图像 滤波图像 $O(N \times N)$	滤波图像 特征矢量 $O(N)$	特征矢量 识别结果 $O(K)$	
架构 I					优点：像素级并行 处理速度快 缺点：分辨率低 识别能力差
架构 II		冯·诺依曼处理器 处理单元阵列	冯·诺依曼处理器 行处理器阵列	多核处理器	优点：多级并行处理 特征提取快 缺点：识别速度慢 算法依赖强
架构 III		冯·诺依曼处理器 处理单元阵列	冯·诺依曼处理器 行处理器阵列	非冯·诺依曼处理器 神经网络	优点：多级并行处理 识别速度快 缺点：算法依赖强
架构 IV		冯·诺依曼处理器 处理单元阵列	卷积神经网络	非冯·诺依曼处理器 神经网络	优点：多级并行处理 特征精度高快 识别精度高 缺点：计算量大

ADC: 模数转换      SH: 采样保持

▲ 图 3 智能视觉系统芯片架构的演进

的操作。架构Ⅱ克服了架构Ⅰ图像分辨率低的问题,将像素阵列和二维处理单元阵列分离,可以独立地设计像素阵列和二维处理单元阵列的规模和性能,并且图像传感器阵列和二维处理单元之间可以实现灵活的映射。但是,由于微处理器的能力无法与二维处理单元阵列和行并行处理器阵列的处理能力相匹配,限制了图像识别处理的速度。图像识别处理所需时间远大于前期图像处理所需时间;因此,根据 Amdahl 定律,图像识别处理将制约系统的性能。

为了提高图像识别的处理速度,我们进一步提出了新的视觉系统芯片体系架构Ⅲ<sup>[7]</sup>。它由图像传感器、二维处理单元阵列、行并行处理器阵列、自组织映射神经网络和微处理器单元构成,分别执行视觉图像传感、图像增强、特征信息提取、图像识别的操作和芯片控制。架构Ⅲ的特点是混合集成了冯·诺依曼型处理器和非冯·诺依曼型自组织映射神经网络处理器。自组织映射神经网络有效地提高了图像识别的处理速度,使图像识别处理的速度很好地匹配前期图像处理的速度,显著提高了视觉系统芯片的性能。其次,自组织映射神经网络电路和二维处理单元阵列电路可以在几个时钟周期内通过动态重构方式实现,从而大幅度节省了芯片的面积。

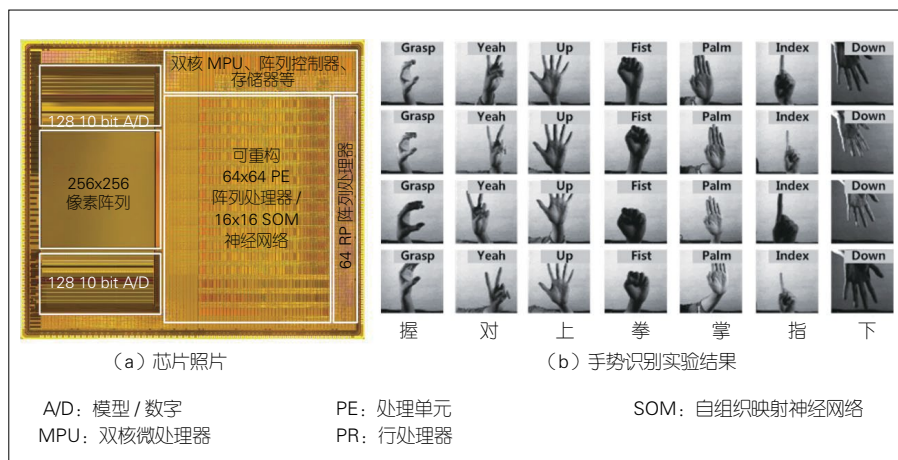
随着基于深度学习的图像信息处理技术的发展,架构Ⅳ的视觉系统芯片体系架构被提出来<sup>[9]</sup>。由于计算视觉的图像信息特征提取和图像识别的精度已被深度学习超越,该架构在特征提取处理阶段用卷积神经网络代替了冯·诺依曼型行并行处理器阵列。该架构充分考虑了计算机视觉和卷积神经网络的计算特点,可以支持卷积神经网络计算和计算机视觉算法计算,二维处理单元阵列、卷积神经网络电

路和检测分类神经网络电路可以通过动态重构技术实现时分复用处理。架构Ⅳ的视觉系统芯片的编程能力、图像信息处理能力和处理能率等各个方面都明显优于前面的视觉芯片,具备实用化应用的能力,在高速运动目标的实时追踪、图像识别、智能交通、虚拟现实、生产线自动产品质量检测及各类智能化玩具等领域具有广泛的应用前景。

### 3 智能视觉系统芯片的设计案例

图 4 给出了基于芯片架构Ⅲ的智能视觉系统芯片的照片和手势识别实验结果<sup>[7]</sup>。芯片集成了高速 CMOS 图像传感器、多级冯·诺依曼型并行处理器和非冯·诺依曼型自组织映射神经网络混合处理器,具备像素级、行级、矢量级和线程级多级并行的完整片上处理功能,可完成高速图像获

取、图像增强、图像特征提取和图像识别的各阶段图像处理任务。芯片的特点是:支持片上自组织映射网络在线训练;以约 2% 芯片总面积开销和 3 个时钟周期的代价实现了二维并行处理单元阵列和自组织映射神经网络的相互重构;是首款体系功能完整的冯·诺依曼/非冯·诺依曼混合处理视觉芯片。芯片采用 0.18  $\mu\text{m}$  图像传感器专用工艺流片实现,它包括一个  $256 \times 256$  的像素阵列、128  $\times$  2 路像素信号处理和 10 bit 模数转换器阵列、动态可重构的  $64 \times 64$  处理单元阵列处理器/16  $\times$  16 自组织映射神经网络处理器、64  $\times$  1 的行处理器阵列、32 bit 精简指令集计算机(RISC)核的双核微处理器(MPU)和控制逻辑电路,芯片面积  $9.8 \text{ mm} \times 8.4 \text{ mm}$ ,系统时钟频率为 50 MHz,功耗为 630 MW。该视觉芯片达到了包括从图像采集到特征识别全



▲图 4 基于架构Ⅲ的智能视觉系统芯片及其测试结果

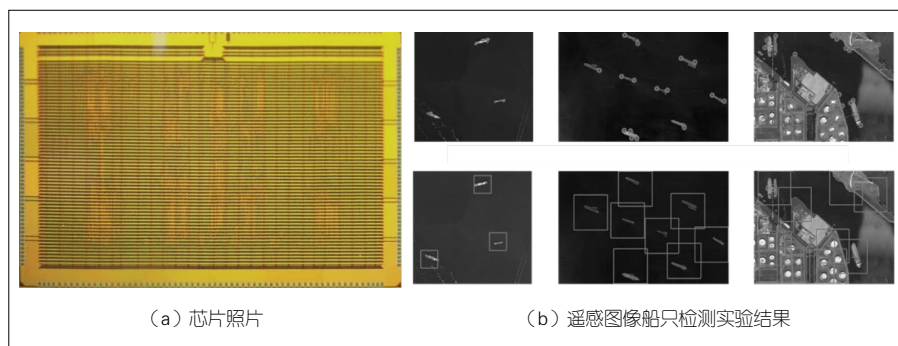


图 5 基于架构Ⅳ的智能视觉系统芯片及测试结果



过程在内的 1 000 fps 系统级性能, 其中特征识别所耗时间小于 0.1 ms。

图 5 给出了基于芯片架构 IV 的智能视觉系统芯片的照片和遥感图像船只检测实验结果<sup>[9]</sup>。芯片采用 65 nm CMOS 工艺集成了多层次的并行处理单元阵列、局域存储器和片上互联网络电路。并行处理单元阵列包括 16 计算簇, 每一个计算簇主要包含 1 个 16 位标量处理单元、32 个互相连接的 16 位向量处理单元及本地存储器。标量处理单元可以灵活地获取和处理 32×32 图像块中任意数据, 每个向量处理单元可以进行像素级的图像处理, 并行处理单元阵列以单指令、多数据模式进行并行运算。RISC32 微处理器和系统总线以及其他相关模块是整个芯片的控制系统, 指挥数据通路和计算阵列协同工作。智能视觉系统芯片可以支持卷积神经网络计算和计算机视觉算法计算, 二维处理单元阵列、卷积神经网络电路和检测分类神经网络电路可以通过动态重构技术实现时分复用处理, 从而可以实现边缘计算型人脸检测和如图 5(b) 所示的遥感图像船只检测的实际应用。这种视觉芯片具有功能完整、处理速度快、功耗低和可灵活可编程的特点, 适合应用于对功耗、尺寸、实时性有较高要求的边缘计算等场合。

#### 4 结束语

本文中, 以我们研究小组长期的研究成果为例子, 介绍了半导体智能视觉系统芯片的研究背景、系统芯片的概念、芯片体系架构的演变、视觉系统芯片的设计案例。尽管视觉系统芯片技术已取得了长足进步, 但视觉系统芯片要真正进入到实用阶段仍然面临着诸多亟待解决的问题。首先,

要提高图像传感器的高分辨下成像速度、暗光条件下成像能力、成像动态范围和高精度三维成像能力, 来满足不断增长的应用需求; 其次, 目前视觉系统芯片的智能化处理能力相对于要求来说比较简单, 还不具备片上学习和图像传感器自适应控制的能力, 并且图像信息分析和处理的能力有限, 无法满足各种实际应用场景下完全自主工作的应用需求; 最后, 在视觉系统芯片集成的技术方面, 由于视觉图像传感器、智能图像处理器和存储器通常采用不同节点的 CMOS 工艺来实现, 并且智能图像处理器和存储器所用的工艺节点通常要比视觉图像传感器的更为先进, 要在单一的硅芯片上实现智能视觉系统芯片很难平衡视觉图像传感器的能力和图像处理器的性能之间的关系<sup>[12]</sup>。因此, 采用三维堆叠集成技术实现智能视觉系统芯片是今后发展的重要趋势。目前中国科学技术部的重点研究计划已经部署了相关的研究项目开展研究, 中国有望在视觉系统芯片领域取得重要的突破。

#### 致谢

本文中所介绍的芯片架构和芯片设计的案例是中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室高速图像传感与图像信息处理课题组成员共同取得的成果, 在此对做出贡献的全体成员表示感谢!

#### 参考文献

- [1] WU N J. Neuromorphic Vision Chips[J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(6): 060421. DOI:10.1007/s11432-017-9303-0
- [2] MEAD C. Neuromorphic Electronic Systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(10): 1629-1636. DOI:10.1109/5.58356
- [3] AIZAWA K. Computational Sensors-Vision VLSI[J]. IEICE Transaction Information System, 1999, E82D(3):580-588

- [4] KOMURO T, KAGAMI S, ISHIKAWA M. A Dynamically Reconfigurable SIMD Processor for a Vision Chip[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(1): 265-268. DOI:10.1109/jssc.2003.820876
- [5] MIAO W, LIN Q Y, ZHANG W C, et al. A Programmable SIMD Vision Chip for Real-Time Vision Applications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(6): 1470-1479. DOI:10.1109/jssc.2008.923621
- [6] ZHANG W C, FU Q Y, WU N J. A Programmable Vision Chip Based on Multiple Levels of Parallel Processors[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2011, 46(9): 2132-2147. DOI:10.1109/jssc.2011.2158024
- [7] SHI C, YANG J, HAN Y, et al. A 1000 Fps Vision Chip Based on a Dynamically Reconfigurable Hybrid Architecture Comprising a PE Array Processor and Self-Organizing Map Neural Network[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(9): 2067-2082. DOI:10.1109/jssc.2014.2332134
- [8] YANG J, YANG Y X, CHEN Z, et al. A Heterogeneous Parallel Processor for High-Speed Vision Chip[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 28(3): 746-758. DOI:10.1109/tcsvt.2016.2618753
- [9] 李鸿龙, 杨杰, 张忠星, 等. 用于实时目标检测的高速可编程视觉芯片[J]. 红外与激光工程. DOI: 10.3788/IRLA202049.20190553
- [10] CULURCIELLO E, ETIENNE-CUMMINGS R, BOAHEN K. A. A Biomimetic Digital Image Sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2003, 2(38):281-294. DOI:10.1109/JSSC.2002.807412
- [11] STROMATIAS E, SOTO M, SERRA-NO-GOTARREDINA T, et al. An Event-Driven Classifier for Spiking Neural Networks Fed with Synthetic or Dynamic Vision Sensor Data[J]. Frontiers in Neuroscience, 2017, (11):350. DOI:10.3389/fnins.2017.00350
- [12] YAMAZAKI T, KATAYAMA H, UEHARA S, et al. 4.9 A 1ms High-Speed Vision Chip with 3D-Stacked 140GOPS Column-Parallel PEs for Spatio-Temporal Image Processing[C]//2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2017: 81-82

#### 作者简介



吴南健, 中国科学院半导体研究所研究员; 主要研究领域为高速图像传感与图像信息处理芯片设计; 已发表论文 300 余篇, 申请专利 100 余项。



# 硅基集成激光雷达技术

## Silicon-Based Integrated LiDAR Technology



王鹏飞 /WANG Pengfei, 罗光振 /LUO Guangzhen, 潘教青 /PAN Jiaoqing

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**摘要:** 论述了硅基相控阵激光雷达和硅基光开关阵列激光雷达的工作原理,并回顾了这两种硅基全固态激光雷达的发展历程。业界对于硅基相控阵激光雷达的研究开始较早,目前已取得了显著成果;但大阵列硅基相控阵激光雷达的控制电路很复杂,实现起来较困难。硅基光开关阵列激光雷达的工作方式非常简单,技术门槛较低,发展迅猛,与硅基相控阵激光雷达在性能上的差距也越来越小。

**关键词:** 激光雷达;硅基;光学相控阵;光开关阵列

**Abstract:** The working principles of silicon-based phased array LiDAR and silicon-based optical switch array LiDAR are discussed, and the development of these two silicon-based all-solid-state LiDAR is reviewed. Among them, the research on silicon-based phased array LiDAR started earlier and has achieved remarkable results, but the control circuit of large-array silicon-based phased array LiDAR is complex and difficult to implement. Because of its simple working mode and low technical threshold, the silicon-based optical switch array LiDAR has developed rapidly, so the performance gap with the silicon-based phased array LiDAR is smaller and smaller.

**Keywords:** LiDAR; silicon-based; optical phased array; optical switch array

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200410.1723.015.html>

网络出版日期: 2020-04-10

收稿日期: 2020-02-20

**激**光雷达俗称 LiDAR,是一种使用激光脉冲来测量障碍物距离的传感技术。早先激光雷达仅限于政府和军事应用,随着技术的进步和激光雷达制造成本的降低,它广泛地渗透到工业和商业领域。这项技术可以快速、准确识别前方障碍物目标,已成为无人驾驶、无人机、智能机器人等领域的关键传感技术,近年来吸引了

众多科研人员及高科技公司的关注。根据最新报告显示,2022 年全球激光雷达市场规模预计将达到 52 亿美元,2017—2022 年间年均复合增长率将达 25.8%。法国市场研究与战略咨询公司 Yole Development 表示,汽车应用激光雷达市场增长趋势将持续到 2032 年,届时市场将达到 280 亿美元。

目前,基于机械式的激光雷达虽然较为成熟,但因体积大、价格高、调试装配复杂、机械部件寿命短等特点,大规模应用受到限制。另一种是

利用微机电系统(MEMS)的激光雷达,它会把所有的机械部件集成到单个芯片,利用半导体工艺生产。它可以取消机械旋转结构,是降低激光雷达成本的一种方式,属于“混合固态”式。该激光雷达光路复杂,扫描效率受微振镜面积限制,且测试结果重复性难以保证。另外,MEMS 环境适应性相对较差,不易通过车规标准,还不能大规模应用在无人驾驶等领域。

纯粹的固态 LiDAR 主要有相控阵激光雷达、Flash 激光雷达和基于时间

**基金项目:** 北京市科技计划(Z191100004819011)、国家自然科学基金(61934007)

飞行原理 (TOF) 相机 3 种。它们都没有机械运动部件, 可以称之为固态 LiDAR。Flash 激光雷达和 TOF 相机在功耗、探测距离等方面局限性很大, 需要较高的激光能量 (一般需要固体激光器或多个半导体激光器的阵列), 光功率很大, 可能伤到人眼。

相控阵激光雷达主要利用光学相控阵 (OPA) 技术来实现光束扫描。激光光源经过光分束器后进入光相位控制阵列, 通过在相位控制阵列上外加控制的方式改变光波的相位, 利用光波相位差来实现光束扫描, 其原理类似于多缝干涉。与机械式扫描技术相比, OPA 作为新型的光学扫描技术具有尺寸小、指向灵活、扫描速度快、功耗低、成本低、精度高等优点。硅基最大的优点是雷达所需要的电驱动芯片、算法处理及成像芯片, 甚至探测都可以利用硅基成熟的微电子技术来实现单片集成; 因此, 硅基光学相控阵激光雷达是近年最前沿的研究热点之一。硅基相控阵激光雷达就是将光源、光分束器、相位调制器、光转束器、探测器等集成在几平方毫米的区域, 快速识别远方目标。近几年, 有很多关于利用硅基光子集成技术制作相控阵激光雷达发射天线的报道。众多研究机构和高技术公司如麻省理工学院 (MIT)、加州大学圣塔芭芭拉分校 (UCSB)、英特尔 (Intel)、根特大学、哥伦比亚大学、Analog Photonics、Voyant Photonics 和中科院半导体研究所等, 都已开展相关研究并取得不错的成果<sup>[11-15]</sup>。我们预测, 硅基激光雷达的成本将降到几十美元。凭借价格的优势, 这种高性能全固态激光雷达的革新势必能推动工业自动化、机器人、无人机及虚拟现实等跨越式发展, 市场潜力巨大。

除了硅基相控阵技术实现的激光雷达外, 另外一种基于硅基光开关

阵列实现的激光雷达技术也逐渐被越来越多的研究者所关注。所述的硅基光开关阵列激光雷达是通过将激光器发射的光经过硅基上的光开关阵列传输到特定位置的光学天线, 并配合天线上方设置的透镜实现光束偏转。其中, 透镜位于光学天线上上方一倍焦距处。根据焦平面定理, 空间中不同方向的平行光经过透镜会在焦平面上汇聚, 也就是聚焦到特定位置的光学天线上。相较于硅基相控阵技术, 这种架构的硅基激光雷达实现起来更加简单, 只需要将级联的光开关打开或关闭即可, 不需要多路联调。配合透镜, 等效的天线口径远大于硅基相控阵形式的激光雷达, 这更利于信号光的发射和探测。目前, 此架构的硅基激光雷达技术已经被很多研究单位所验证, 例如雅典大学、哥伦比亚大学、MIT、上海交通大学和日本横滨国立大学等都已取得初步成果<sup>[16-20]</sup>。其中, 日本横滨国立大学通过采用特殊透镜, 实现了  $40^\circ \times 4.4^\circ$  的二维扫

描, 并且光斑发散角小于  $0.15^\circ$ 。这个结果已经可以和 512 通道的硅基相控阵激光雷达相媲美, 但是实现方式却极其简单。

综上所述, 各种形式的激光雷达具有各自的特点, 表 1 对比了上述各种激光雷达的性能差异。下面我们详细介绍全球硅基相控阵激光雷达和硅基光开关阵列激光雷达的研究情况。

## 1 硅基相控阵激光雷达

相控阵激光雷达主要利用光束间的相位差来控制光束方向。相比于传统的机械光束扫描装置, 相控阵激光雷达极大地减小了尺寸, 降低了能耗, 常用来实现光控相控阵的材料有铌酸锂、液晶、压电陶瓷。铌酸锂制作的相控阵主要利用普克尔效应和克尔效应, 实现电场对光波导相位的调控。光束扫描的速度很快, 可达皮秒量级; 但操作电压高, 功耗非常大, 扫描角度较小。此外, 相对较大的相移器间隔、小的孔径填充因子和较大的插入损耗

▼ 表 1 不同形式激光雷达性能对比

激光雷达分类		优点	缺点
机械式激光雷达		• 器件成熟, 已实现量产	• 体积大 • 价格高 (5~8 万美金 / 个, 64 线) • 机械部件 (稳定性及耐久性差)
MEMS 激光雷达		• 微机电扫描形式 • 体积小, 结构简单 • 价格较便宜	• MEMS 环境适应性较差 • 不易通过车规标准 • 暂未大规模应用
全固态激光雷达	Flash 激光雷达	• 微机电扫描形式 • 体积小, 结构简单 • 价格较便宜	• 需要较高的激光能量, 可能伤到人眼 • 成本高 • 信号处理难度高, 不易民用
	TOF 相机	• 无扫描结构 • 探测距离远	• 需要固体激光器或多个半导体激光器的阵列 • 功耗大 • 探测距离短
	硅基相控阵激光雷达	• 无扫描结构 • 成本较便宜	• 技术难度大 • 处于研发阶段, 尚无相关产品
	硅基光开关阵列激光雷达	• CMOS 工艺流片 • 产量大 • 无机扫描部件 • 成本低 • 性能优异 • 尺寸小	• 起步最晚 • 处于研发阶段, 尚无相关产品

CMOS: 互补金属氧化物半导体

MEMS: 微机电系统

TOF: 飞行时间

也阻碍了它的发展。液晶技术的优点是所需驱动电压较低、功耗小、使用寿命长、扫描角度较大；缺点是热稳定性差，工作波长范围受限制且响应速度较慢，响应速度通常为毫秒量级。压电陶瓷电光系数大、透射光谱宽、损耗低且价格便宜，利用压电陶瓷实现光控扫描速度较快，一般为纳秒量级；但是所需的工作电压非常高（约为 1 kV）且造价较高，不适合民用。

随着硅基光子集成技术的迅猛发展，硅基光子学技术已被广泛研究，在一个芯片上可以集成成千上万个光电子器件。利用硅基光子集成技术制作的器件，工作在光通信波段，可以与光纤网络直接互联。相比于传统的工作在可见光波段和近红外波段的

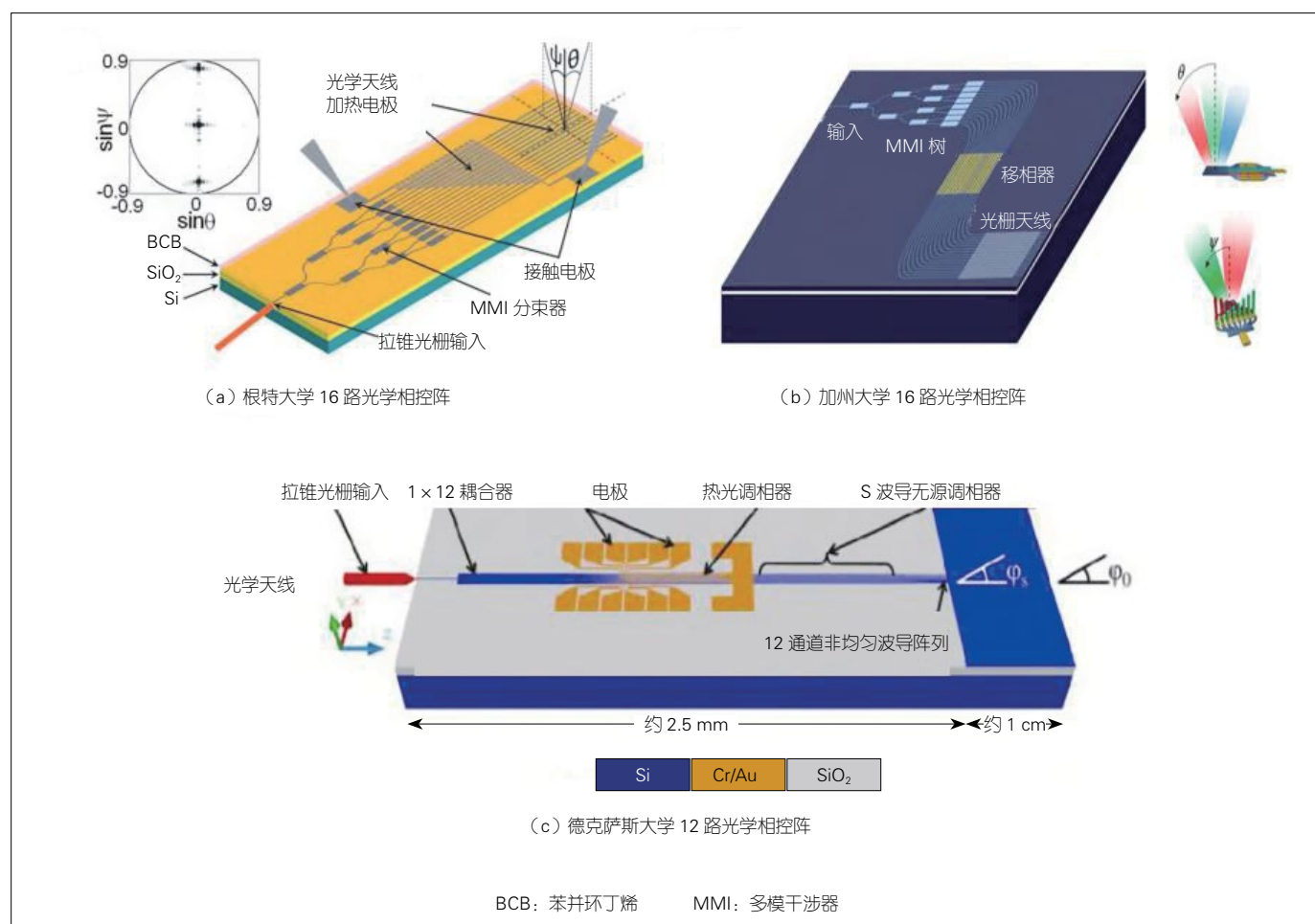
器件，此工作波段处于人眼安全的范畴（ $1.4\sim 2.0\ \mu\text{m}$ ），有利于光控相控阵的产品进入民生领域。同时，硅基光子技术与集成电路技术完全兼容，可在单片上同时集成光束扫描器件与电控制逻辑电路，有利于实现智能化控制和神经网络集成等。

随着互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺的成熟，越来越多的 OPA 相关研究将焦点放在基于绝缘衬底上的硅（SOI）的 OPA 上。2009 年，根特大学的 K. VAN ACOLEYEN 等报道的一维光学相控阵如图 1（a）所示<sup>[1]</sup>，该相控阵通过热光调谐来改变相位。由于采用的是移相器整体加热的方法，扫描角度较小，在  $1550\ \text{nm}$  波长下的扫描角度仅为  $2.3^\circ$ ；但波长调谐实现

的扫描角度为  $14.1^\circ$ 。2010 年，该课题组在之前研究的基础上又报道了基于波长调谐的二维光学相控阵<sup>[2]</sup>，实现了  $0.24^\circ/\text{nm}$  的转向速度，天线损耗小于 3 dB。2011 年，基于热光调谐的 16 个阵元的光学相控阵被提出，具有  $23^\circ$  的视场范围，同时通过减小波导间距可以有效增加视场范围<sup>[3]</sup>。

2011 年，加州大学的 J. K. DOYLEND 等同样采用了波长调谐和移相器单个加热的方式，制备了 16 通道的二维转向光相控阵列<sup>[4]</sup>，如图 1（b）所示。该方式在调相的方向上实现了  $20^\circ$  的扫描角度，调波长时实现了  $14^\circ$  的扫描角度，远场分辨率小于  $1^\circ$ ，背景抑制比超过 10 dB。

对于周期性的波导光学相控阵来



▲图 1 所报道的各硅基光学相控阵芯片示意图



说, 由于相邻波导之间拥有相同的相位差, 在远场干涉时容易出现旁瓣, 造成主瓣能量损失、波束展宽, 影响波束扫描效果。2011年, 德克萨斯大学的 D. KWONG 等首次报道了一种如图 1(c) 所示的非周期性的 OPA 结构<sup>[5]</sup>。该结构输入端经过  $1 \times 12$  的多模干涉器 (MMI) 耦合进入不等间距的直波导, 通过热调的方式实现调相, 在远场不同方向上发生干涉, 从而实现波束扫描。这样一来, 热光调谐单元后还有时延线, 可以补偿非等间距波导所引入的相位差, 从而使得在不加热的情况下, 不会发生波束的偏转。

2013年, MIT 在 SOI 上实现成像用大规模二维光学光相控阵<sup>[6]</sup>, 如图 2(a) 所示。该器件采用直接给硅波导加热的方式进行热光调制, 加热效率较高。另外, 该相控阵列的  $64 \times 64$

(4 096) 个纳米天线均集成在一块硅芯片上, 实现最大规模二维 OPA; 器件的尺寸却只有  $576 \mu\text{m} \times 576 \mu\text{m}$ 。但由于阵元密集、量大, 电调谐扫描仅在  $8 \times 8$  上展示, 扫描角度较小。

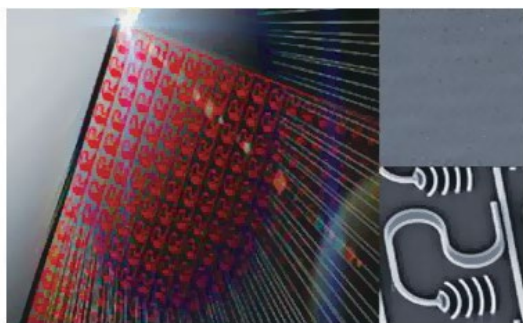
2014年, MIT 的 A.YACOBI 等人采用两侧浅刻蚀的光栅天线和直接给硅波导加热的方式<sup>[7]</sup>, 研制出了  $51^\circ$  的大扫描角度 OPA。器件最大电压信号为 10.6 V 时, 每个天线只消耗 18 mW 的能量, 具有 100 kHz 的扫描速度。该系统可在波长范围  $1.2 \sim 3.5 \mu\text{m}$  内工作。

2016年, MIT 的 C.V. POULTON 等采用分组级联移相器的方式来补偿相位噪声, 减少控制电极的数量<sup>[8]</sup>, 从而设计出了小光束宽度、大转向范围的 OPA。如图 2(b) 所示, 该器件采用了三级级联, 包含 50 个光栅天线, 器件

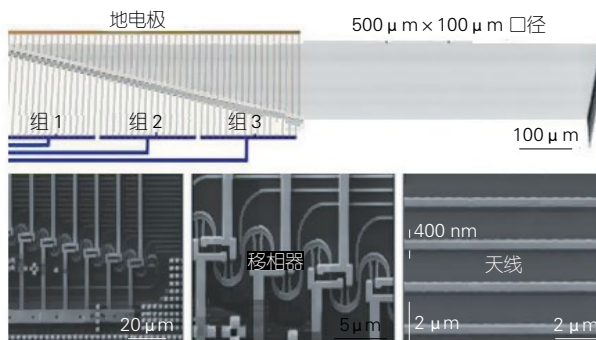
尺寸为  $1\,200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ , 光束宽度为  $0.85^\circ \times 0.18^\circ$ 。在加热功率为 1.2 W 下, 波长从 1 454 ~ 1 641 nm 调谐时, 器件的扫描范围可达  $46^\circ \times 36^\circ$ 。

2016年, Intel 公司的 Hutchison 等人采用一维非等间距光栅和浅刻蚀光栅天线的方式, 实现了迄今转向角最大的一维高分辨率 OPA<sup>[9]</sup>。调相时其扫描角度为  $80^\circ$ , 可分辨 500 个点, 波长调谐方向则可实现  $17^\circ$  的光束扫描。二维扫描时可分辨 6 000 个点, 两个方向上的发散角均为  $0.14^\circ$ , 器件结构如图 2(c) 所示。

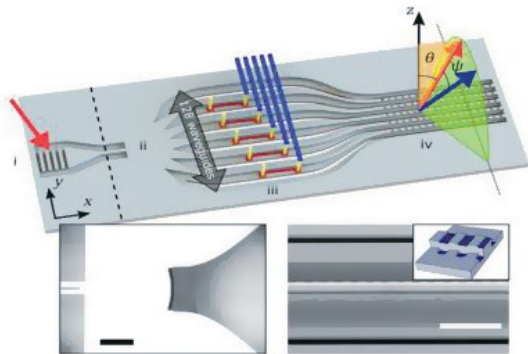
在 OPA 的研究中, 改善光栅天线的性能一直是研究的重点之一。增加单根光栅天线上的有效光栅数量, 能有效改善波长调谐方向的光束发散特性。2018年, 哥伦比亚大学的 Moshe 等在硅波导上引入了氮化硅 (光栅齿



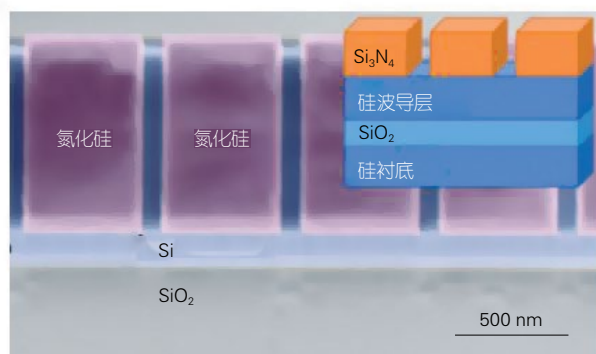
(a) 麻省理工学院二维光学相控阵



(b) 麻省理工学院一维光学相控阵



(c) 英特尔一维光学相控阵



(d) 哥伦比亚大学 SiN-Si 天线

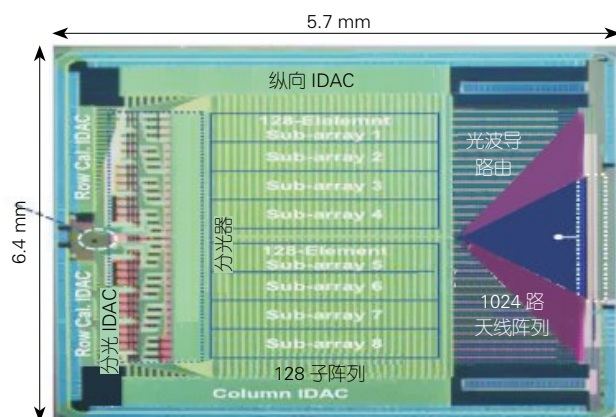
▲ 图 2 所报道各硅基光学相控阵芯片示意图

采用氮化硅材料),如图2(d)所示<sup>[10]</sup>。该方法利用 SiN-Si 对光扰动作用小的特性(相比于 Si-SiO<sub>2</sub> 结构),将单根光栅天线的有效口径延长至 1 mm,有效增加了单根光栅天线上的有效光栅

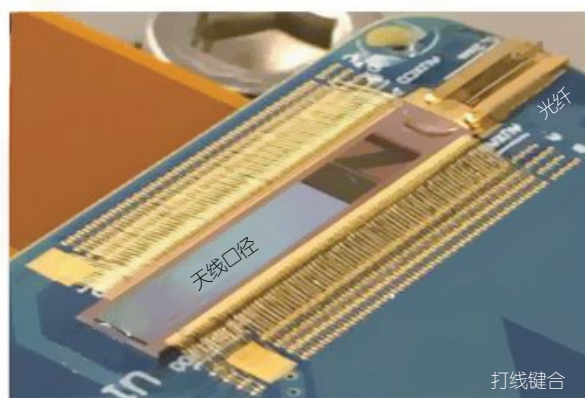
数量,从而使波长调谐方向上的发散角降低到 0.089°。

电光混合集成在同一个芯片上能大大缩小器件的整体尺寸,同时能提升器件的整体性能,这是硅基光子集成技

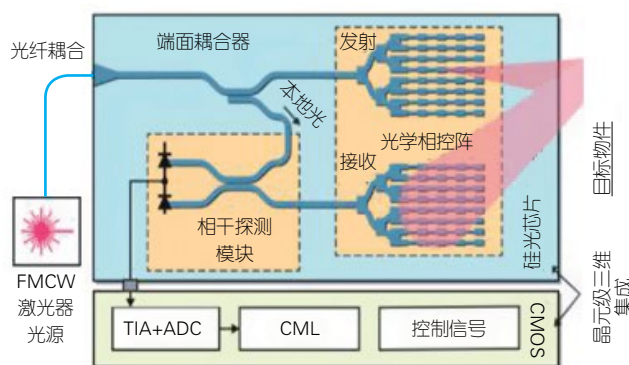
术发展的一个重要趋势。2018 年,南加州大学 S. WON 等报道了控制电路和光路混合集成在同一个芯片上的大规模 OPA<sup>[11]</sup>,如图 3(a)所示。该器件采用 180 nm CMOS 工艺,在 5.7 mm × 6.4 mm



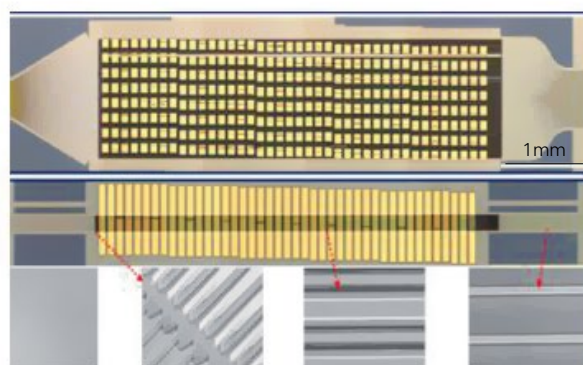
(a) 雅典大学 InP 光开关阵列



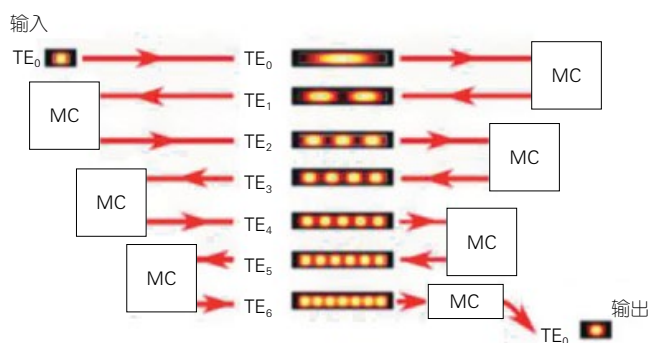
(b) 麻省理工学院 512 路 OPA



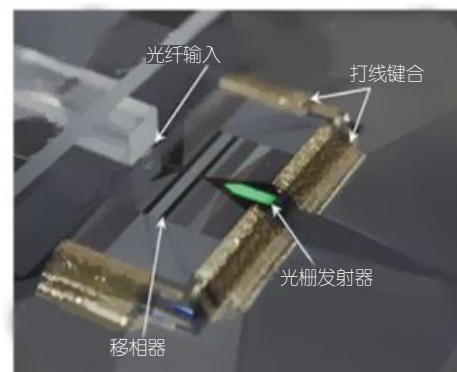
(c) 加州大学伯克利分校硅光-互补金属氧化物半导体三维集成 OPA



(d) 美国加州大学圣塔芭芭拉分校 240 路 OPA



(e) 哥伦比亚大学多次光循环调相器及 512 路 OPA



ADC: 模数转换器  
CML: 电流模式逻辑  
CMOS: 互补金属氧化物半导体

FMCW: 调频连续波  
IDAC: 综合数据采集与控制  
MC: 模式变换器

OPA: 光学相控阵  
TE: 横电模  
TIA: 跨阻放大器

▲ 图 3 所报道各硅基光学相控阵芯片示意图



的芯片上制作了 1 024 路波导光栅、1 192 个移相器、168 个衰减器、136 个数模转换器和其他电学或光学元器件。该 OPA 能达到  $0.03^\circ$  的分辨率。

2018 年, 美国 MIT 的 M. R. WATTS 团队在之前工作的基础上, 报道了 512 路 OPA 芯片<sup>[12]</sup>, 实现了 25 m 探测距离, 并对所提出的激光雷达芯片进一步改进, 于 2019 年实现了接近 200 m 的测距。该实验成果是硅基相控阵激光雷达实用性的极有利证明, 其芯片结构及探测性能如图 3 (b) 所示。该硅基相控阵激光雷达采用双层 SiN 结构的天线实现了超过 90% 的定向发射、10 ns 调相上升沿的调相速率、低至 2  $\mu$ W 的  $2\pi$  调相功耗, 扫描范围达到了  $56^\circ \times 15^\circ$ 。

进一步地, M. R. WATTS 和加州大学伯克利分校的 V. STOJANOVIC 团队联合提出了硅基 OPA 芯片和 CMOS 驱动电路的三维集成<sup>[13]</sup>。其具体方式是采用氧化层通孔技术, 将倒扣的硅基 OPA 芯片与对应的 CMOS 驱动电路垂直互联, 如图 3 (c) 所示。通过这种集成封装的形式, 可以大大减小整个激光雷达的体积, 使其更容易被镶嵌在特定应用场景的对应设备上。

2019 年, UCSB 报道了 240 路 OPA 芯片<sup>[9]</sup>, 如图 3 (d) 所示。该芯片采用 SiN/Si 双层结构光栅作为光学天线, 该光栅可实现厘米量级的有效天线口径, 使光斑发散角达到  $0.02^\circ$ 。另外, 该芯片采用 III V-Si 混合的集成调制器, 并可以将调制速率提高到 1 GHz, 调制功耗小于 3 nW, 而只引入 0.1~0.5 dB 的损耗。

2020 年 1 月, 美国哥伦比亚大学的 M. LIPSON 团队报道了最新的 512 路估计 OPA 芯片<sup>[14]</sup>, 如图 3 (e) 所示。该芯片采用一种对多次光循环波导进行加热的热光移相器结构, 使得在很小的芯片范围内, 使用很低的功耗就可实现  $\pi$  相移。具体地, 通过一系列

回旋的波导结构, 使得波导中激光的模式从横电 (TE<sub>0</sub>) 不断变化到 TE<sub>6</sub>, 并再从 TE<sub>6</sub> 变化到 TE<sub>0</sub> 后输出。在此变化过程中, 激光不断经过加热区域, 从而使得加热效率提高了接近 9 倍。这是目前所报道的功耗最低的热光调相方式, 具体调相功耗为  $1.7 \text{ mW}/\pi$ , 并且其 OPA 芯片实现了  $70^\circ \times 6^\circ$  的二维扫描。

中国对硅基光学相控阵的研究起步相对较晚, 主要的高校和科研机构有中国科学院半导体研究所、上海交通大学、北京大学、清华大学、浙江大学等, 它们基本上都是从 2016 年以后相继开展相关研究, 与其他国家有着 5 年以上的差距, 所研制光学相控阵芯片也处于原理验证及各分立器件优化阶段, 性能上也有很大差距, 尤其是在角分辨率、扫描速度、探测距离等方面。其中, 本研究团队从 2017 年开始着力于硅基 OPA 芯片的开发, 目前已取得了较大进展, 在中国处于领先水平。本团队提出了氮化硅-硅双层 OPA 芯片<sup>[15]</sup>, 如图 4 所示。该芯片结合了硅的优良调制特性和氮化硅的低损耗特性, 大大提高了单层硅光学相控阵的性能, 并采用独创的整体型光学天线实现了  $96^\circ$  的扫描范围。

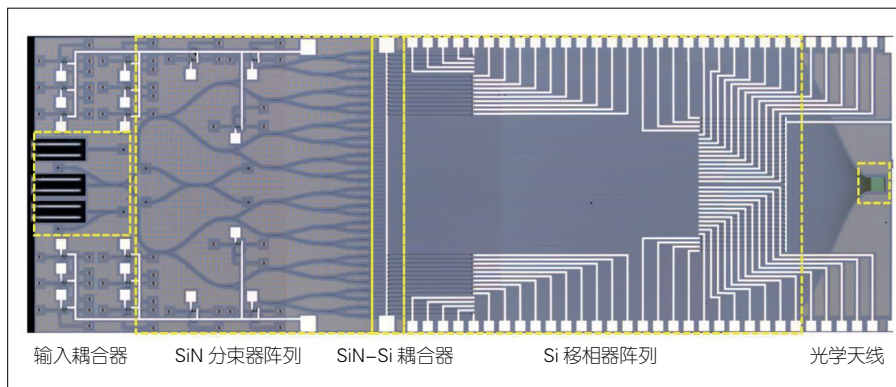
## 2 硅基光开关阵列激光雷达

由于硅基相控阵激光雷达具有较

高的技术门槛, 近几年越来越多的团队开始研究一种新型的硅基激光雷达形式——硅基光开关阵列激光雷达。该形式的激光雷达同样是全固态的, 没有任何机械运动部件, 并且工作方式极其简单, 是一种性价比较高的激光雷达方案。

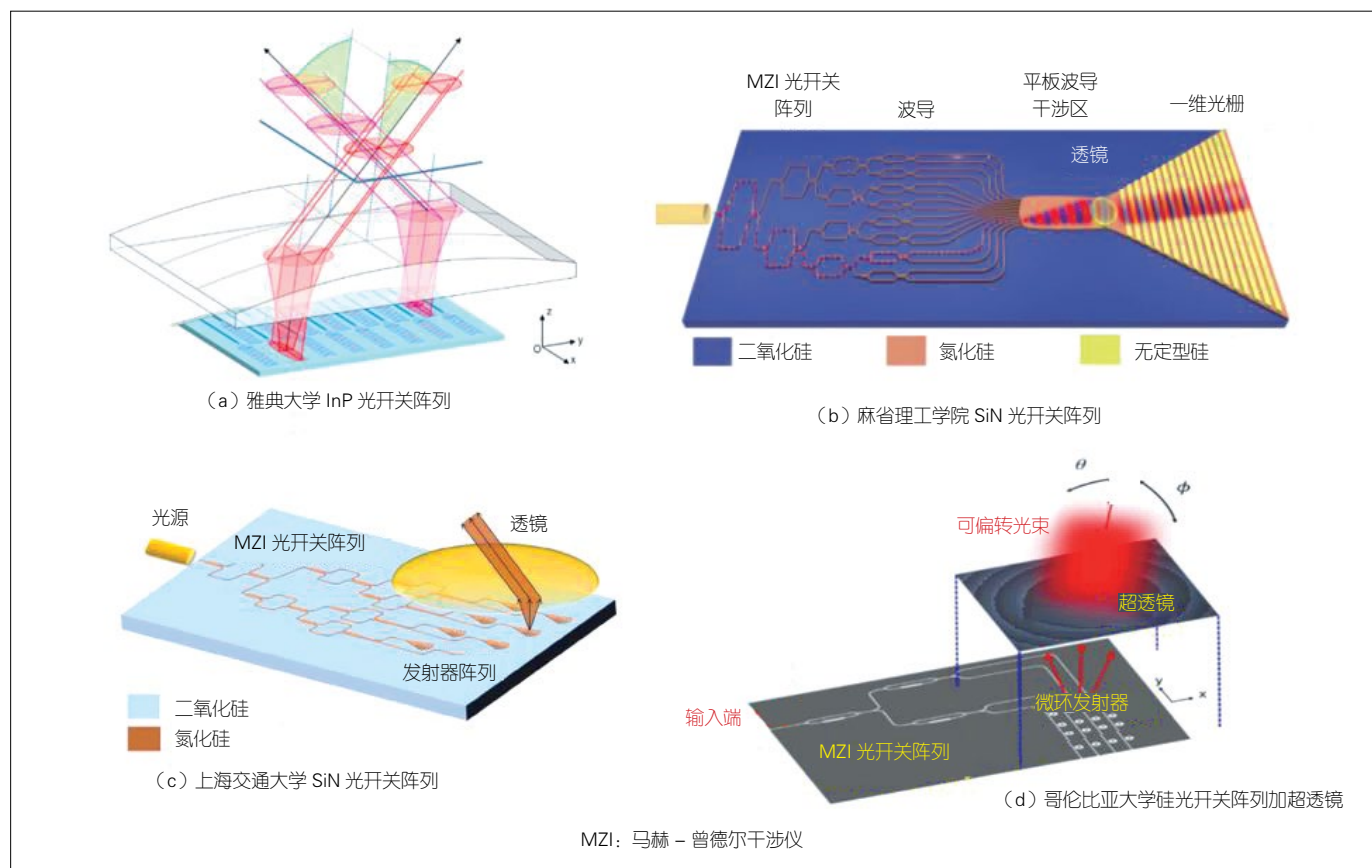
2018 年, 雅典大学的 C. CHAINTOUTIS 等提出了基于芯片上不同位置光学天线加透镜的形式实现光束转向<sup>[16]</sup>, 如图 5 (a) 所示。该方式虽然是在 InP 平台上实现的, 却开创了该形式激光雷达的先河。不同位置的光学天线发射的光束经过上方的透镜可以实现不同方向的光束偏转。区别于 OPA 方案, 该方案不需要多路联调光相位, 只需要将光束在片上切换至特定位置的天线即可。该方案工作方式简单, 且不需要很大规模的驱动电路。

同年, 美国 MIT 的 S. A. SKIRLO 等在 SiN 平台上实现了二维扫描<sup>[17]</sup>, 如图 5 (b) 所示。该芯片独特的将透镜设置在片上并位于一个整体光学天线前端。通过前端光开关阵列将光在片上切换至不同位置, 并经过片上的透镜实现一维转向, 然后当光经过后端整体光学天线时, 改变波长, 可以实现另外一个维度的光束转向。两个方向的扫描相结合, 最终实现了  $38.8^\circ \times 12^\circ$  的二维扫描。



▲图 4 氮化硅-硅双层光学相控阵芯片



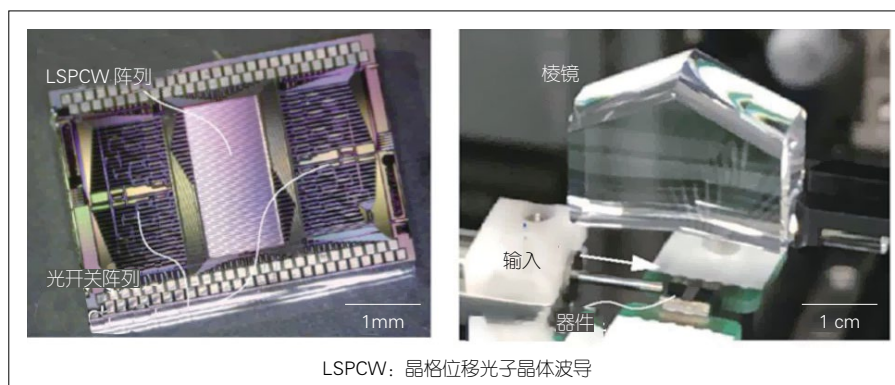


▲图5 所报道各硅基光开关激光雷达芯片示意图

2019年,上海交通大学的陈建平团队在SiN平台上制备了基于光开关阵列的 $4 \times 4$ 天线阵列<sup>[18]</sup>,如图5(c)所示。该天线阵列原理性验证了光开关阵列加透镜形式的激光雷达芯片的可行性。

除了以上所述的常规光学透镜之外,我们也可以采用一些其他形式的透镜来实现。2019年,哥伦比亚大学M. LIPSON团队提出了基于光开关网络加超透镜的激光雷达芯片<sup>[19]</sup>,如图5(d)所示。所提出的 $4 \times 4$ 阵列制备于顶硅220 nm的SOI衬底上,实现了 $12.4^\circ \times 26.8^\circ$ 的二维扫描, $0.8^\circ$ 的光斑发散角。其中,超透镜被制作于硅片上,具有68%的透过率。

2020年,日本横滨大学的TOSHIHIKO B.团队采用光开关网络加特殊透镜的形式<sup>[20]</sup>,如图6所示。他



▲图6 光学晶体波导光开关阵列加特殊透镜激光雷达

们在硅光平台上制作了光学晶体型的波导及左右对称 $1 \times 16$ 光开关网络,并采用一个定制的特殊形状的透镜,实现了 $40^\circ \times 4.4^\circ$ 的二维扫描,光斑发散角为 $0.15^\circ$ ,可分辨发射光斑有效点数为4256个。该芯片性能可媲美512路OPA芯片,但更容易实现。这对光开关阵列加透镜形式的激光雷达

芯片的发展起到极大的推动作用,未来将会受到越来越多的研究者的青睐。

虽然硅基光开关阵列形式的激光雷达芯片在近几年受到越来越多的研究者的青睐,但其本身存在一定局限性,最主要是受限于光开关阵列的规模。由于光开关形式的激光雷达芯片是通过切换不同的光学天线来实现不

同角度的扫描。若要满足实际运用的需求,则需要非常多的光学天线,也就是需要非常大的光开关阵列,这将使得片上的光损耗非常大。所以这种形式的激光雷达芯片仍需要进一步研究,直到解决上述问题并最终满足实用需求。

### 3 结束语

激光雷达作为自动驾驶技术的核心部件,受到广泛关注。其中,硅基集成的全固态激光雷达更是被誉为下一代产品,将替代现有的机械式或MEMS激光雷达。本文中,我们论述了硅基相控阵激光雷达和硅基光开关阵列激光雷达的工作原理及发展历程,并对比了这两种形式激光雷达各自的特点。其中,硅基相控阵激光雷达的研究开展较早,目前已取得显著成果;硅基光开关阵列激光雷达开展较晚,但是由于其极其简单的实现方式将得到迅猛的发展。目前,以上这两种架构的硅基激光雷达均处于研发阶段,国际上还没有相关产品的报道。希望经过科研人员的不断努力与创新,硅基相控阵激光雷达能够早日达到商用水平。

#### 参考文献

- [1] VAN ACOLEYEN K, BOGAERTS W, JÁGER-SKÁ J, et al. Off-Chip Beam Steering with a One-Dimensional Optical Phased Array on Silicon-on-Insulator[J]. Optics Letters, 2009, 34(9): 1477. DOI:10.1364/ol.34.001477
- [2] VAN ACOLEYEN K, ROGIER H, BAETS R. Two-Dimensional Optical Phased Array Antenna on Silicon-on-Insulator[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13655. DOI:10.1364/oe.18.013655
- [3] VAN ACOLEYEN K, KOMOROWSKA K, BOGAERTS W, et al. One-Dimensional Off-Chip Beam Steering and Shaping Using Optical Phased Arrays on Silicon-on-Insulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(23): 3500-3505. DOI:10.1109/jlt.2011.2171477
- [4] DOYLEND J K, HECK M J R, BOVINGTON J T, et al. Two-Dimensional Free-Space Beam Steering with an Optical Phased Array on Silicon-on-Insulator[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21595. DOI:10.1364/oe.19.021595
- [5] KWONG D, HOSSEINI A, ZHANG Y, et al. 1 × 12 Unequally Spaced Waveguide Array for Actively Tuned Optical Phased Array on a Silicon Nanomembrane[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(5): 051104. DOI:10.1063/1.3619847
- [6] SUN J, TIMURDOGAN E, YAACOB A, et al. Large-Scale Nanophotonic Phased Array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195-199. DOI:10.1038/nature11727
- [7] YAACOB A, SUN J, MORESCO M, et al. Integrated Phased Array for Wide-angle Beam Steering[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4575. DOI:10.1364/ol.39.004575
- [8] POULTON C V, YAACOB A, SU Z, et al. Optical Phased Array with Small Spot Size, High Steering Range and Grouped Cascaded Phase Shifters[C]//Advanced Photonics 2016 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF). Vancouver, USA: OSA, 2016: IW1B.2. DOI:10.1364/iprsn.2016.iw1b.2
- [9] XIE W Q, KOMLJENOVIC T, HUANG J X, et al. Heterogeneous Silicon Photonics Sensing for Autonomous Cars [Invited][J]. Optics Express, 2019, 27(3): 3642-3663. DOI:10.1364/oe.27.003642
- [10] ZADKA M, CHANG Y C, MOHANTY A, et al. On-chip Platform for a Phased Array with Minimal Beam Divergence and Wide Field-of-View[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2528-2534. DOI:10.1364/oe.26.002528
- [11] CHUNG S, ABEDIASL H, HASHEMI H. A Monolithically Integrated Large-Scale Optical Phased Array in Silicon-on-Insulator CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2018, 53(1): 275-296. DOI:10.1109/jssc.2017.2757009
- [12] 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. DOI:10.1109/jstqe.2019.2908555
- [13] BHARGAVA P, KIM T, POULTON C V, et al. Fully Integrated Coherent LiDAR in 3D-Integrated Silicon Photonics/65nm CMOS[C]//2019 Symposium on VLSI Circuits 2019. Kyoto, Japan: IEEE, 2019:C262-C263. DOI: 10.23919/VLSIC.2019.8778154
- [14] MILLER S A, CHANG Y C, PHARE C T, et al. Large-Scale Optical Phased Array Using a Low-Power Multi-Pass Silicon Photonic Platform[J]. Optica, 2020, 7(1): 3-6. DOI:10.1364/optica.7.000003
- [15] WANG P F, LUO G Z, YU H Y. Design and Fabrication of SiN-Si Dual-Layer Optical Phased Array Chip[C]//Asia Communications and Photonics Conference. USA: Optical Society of America, 2019:M4B. 6
- [16] CHAINTOUTIS C, SHARIATI B, BOGRIS A. Free Space Intra-Datcenter Interconnects Based on 2D Optical Beam Steering Enabled by Photonic Integrated Circuits[J]. Photonics, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018, 5(3):21
- [17] LOPEZ J J, SKIRLO S A, KHARAS D. Planar-Lens Enabled Beam Steering for Chip-Scale Lidar[C]//2018 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). USA: IEEE, 2018: 1-2
- [18] LI C, CAO X Y, WU K, et al. A Switch-based Integrated 2D Beam-steering Device for Lidar Application[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose, USA: OSA, 2019: JTh2A. 73. DOI:10.1364/cleo\_at.2019.jth2a.73
- [19] CHANG Y C, SHIN M C, PHARE C T, et al. Metalens-Enabled Low-Power Solid-State 2D Beam Steering[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. USA: OSA, 2019: SF3N. 5
- [20] ITO H, KUSUNOKI Y, MAEDA J, et al. Wide Beam Steering by Slow-light Waveguide Gratings and a Prism Lens[J]. Optica, 2020, 7(1): 47-52. DOI:10.1364/optica.381484

#### 作者简介



**王鹏飞**, 中国科学院半导体研究所读博士; 主要从事硅基相控阵激光雷达及硅基光学神经网络相关的研究。



**罗光振**, 中国科学院半导体研究所读博士; 主要从事硅基相控阵激光雷达及VCSEL阵列相关的研究。



**潘教青**, 中国科学院半导体研究所研究员、博士生导师, 兼任中国科学院大学岗位教授; 主要研究方向为硅基单片集成激光雷达、硅基纳米激光器、TDLAS传感系统和InP基单片集成光子芯片等; 先后主持了国家重点研发计划、国家科技重大专项、国家“863”项目和国家自然科学基金重点项目等。



# 智能硅基多维复用与处理芯片

## Intelligent Silicon-Based Multi-Dimensional Multiplexing and Processing Chips

王健 /WANG Jian, 郑爽 /ZHENG Shuang, 曹晓平 /CAO Xiaoping

(华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074)

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**摘要:** 全面综述了硅基光子单一维度和多个维度的复用与处理, 梳理了智能硅基光子集成器件的发展过程。智能硅基多维复用与处理芯片能充分开发和利用光子多维度资源, 并能结合硅基光子集成芯片的优势, 有望解决光通信新容量危机和新能耗危机提供核心光电子支撑技术和芯片, 从而为实现光通信可持续发展和其他相关应用提供潜在芯片级集成化解决方案。

**关键词:** 硅基光子学; 光通信; 光子集成芯片; 多维复用与处理; 人工智能; 神经网络

**Abstract:** In this paper, silicon-based photonic single- and multi-dimensional multiplexing and processing are comprehensively reviewed. The development of intelligent silicon-based photonic integrated devices is also reviewed. Intelligent silicon-based multi-dimensional multiplexing and processing chips can fully develop and make use of multiple physical dimension resources of photons and take the distinct advantages of silicon-based photonic integrated circuits. It is expected to provide the key optoelectronic supporting techniques and chips for addressing the capacity crunch and energy consumption crisis of optical communications. Consequently, intelligent silicon-based multi-dimensional multiplexing and processing chips provide the potential chip-level integrated solutions for realizing the sustainable development of optical communications and other related applications.

**Keywords:** silicon photonics; optical communications; photonic integrated circuits; multi-dimensional multiplexing and processing; artificial intelligence; neural network

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002008

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/34.1228.TN.20200423.1629.004.html>

网络出版日期: 2020-04-23

收稿日期: 2020-03-20

在硅基光电子概念提出之前, 互补金属氧化物半导体 (CMOS) 集成电路遵循着摩尔定律飞速发展。20

世纪 80 年代, R. SOREF 等发现硅基集成平台对于 1 550 nm 通信波段也非常适合<sup>[1-2]</sup>。此后, 硅基光子集成得到了极大关注和快速发展。硅在近红外波段的折射率约为 3.5。如果以空气或二氧化硅为包层, 可利用硅与包层的大折射率差将光场紧密地束缚在微纳尺度下的波导结构内, 然后通过电光、热光等调制手段有效调控光场, 进而逐步将光的调制、探测和发射全部集

成在毫米级别的芯片上<sup>[3]</sup>。硅光子集成的优势在于: 以光为载体的信息传输具备超高速、低损耗、低功耗以及高带宽的特点; 硅光子集成的工艺流程可以与现有硅基 CMOS 集成电路工艺兼容, 这有助于混合硅基光电子的集成<sup>[4]</sup>。近年来, 硅基光子集成器件逐渐从学术界的研究转变到产业界的实际应用当中, 特别是在高速光通信中硅基集成器件的使用上 (包括调制

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2019YFB2203604、2018YFB2200204)、国家自然科学基金 (11774116)、湖北省杰出青年基金 (2018CFA048)、广东省重点领域研发计划 (2018B030325002)、长江学者奖励计划青年学者、国家万人计划青年拔尖人才、华中科技大学学术前沿青年团队 (2016QYTD05)



器、探测器、光开关以及相干接收机等)扮演着核心的角色<sup>[5-10]</sup>。一系列的进展和突破加速了大数据时代和全球信息一体化进程的到来。同时,海量数据的传输和处理对高速大容量光通信提出了更高的要求。

在以光纤网络传输为核心的光通信系统中,通信容量的提升面临着很大的压力。传统的光通信技术主要围绕着光的波长维度进行开发利用,例如,在C+L波段采用更加密集的波分复用技术(WDM)来增大通信容量<sup>[11]</sup>。与此同时,对光单一维度资源的开发也面临着越来越大的挑战,并且慢慢接近极致。光的多维度资源利用,如光时分复用(OTDM)、偏振复用(PDM)、高级调制格式等技术引领了光通信的发展变革<sup>[12-16]</sup>。然而,近年来这些光波维度资源几乎达到极致,例如,光时分复用(OTDM)技术已达到T波特符号率<sup>[14]</sup>,PDM技术受限于两个偏振<sup>[15]</sup>,高级调制格式已经达到超高维度正交幅度调制(4096-QAM)<sup>[16]</sup>;因此,光波的空间结构维度被视为新的维度资源。

光波的空间结构维度可以与光波的波长、偏振、时间和复振幅等多个维度资源相结合,以进一步提升通信容量。对光纤网络系统而言,光波空间结构维度资源的利用实际上是对光纤介质的改变和升级。由现有的单芯单模光纤发展出多芯光纤、少模光纤和多芯少模光纤等,通过将空分复用(SDM)技术与WDM、PDM、OTDM和高级调制格式技术相结合来提升通信容量<sup>[17-22]</sup>。2012年,研究人员在实验中结合WDM、PDM和高级调制格式实现了11 bit/(s·Hz)的净频谱效率,其中标准单模光纤(SSMF)在165 km的传输速率为101.7 Tbit/s,共使用了370个密集波分复用(DWDM)信道,这些信道间隔为25 GHz,覆

盖整个C+L波段,每个25 GHz信道被细分为4个子带,每个子带携带73.5 Gbit/s正交频分复用(OFDM)信号,在每个调制的副载波上用PDM和128-QAM调制<sup>[11]</sup>。近年来,SDM技术利用空间域的光场复用进一步提升通信容量。按照不同的空间模式,空间域结构光场包括轨道角动量(OAM)模式、贝塞尔模式、线偏振(LP)模式、矢量模式、空间阵列等<sup>[20]</sup>。例如,在自由空间光通信中,利用双同心环偏振复用8个OAM模式(32个信道),实验实现了2.56 Tbit/s通信容量和95.7 bit/(s·Hz)频谱效率<sup>[21]</sup>;在光纤通信中,利用环形芯光纤有效抑制径向高阶模式,结合12.5 Gbaud 8-QAM信号、两个OAM高阶模式(模群复用)、112个波长,实验实现了18 km光纤OAM复用通信,无须多输入多输出(MIMO)数字信号处理<sup>[22]</sup>。

在整个光通信系统中,光波全维度资源的利用对硅基集成芯片在光波多维复用和处理上提出了更高的要求。为充分发挥全维度资源在光通信系统中的优势,硅基光子集成芯片也需要具备多维复用与处理的能力<sup>[23-24]</sup>。同时,随着近年来大数据时代的到来和人工智能的兴起,人们对硅基光子集成芯片的要求也从常规的多功能、可调谐、可编程转变为智能化,要求硅基光子集成芯片能够在某些方面(比如光计算等)超越并替代传统电子芯片的功能<sup>[25-27]</sup>。

## 1 光子的基本维度资源和硅基光子集成芯片的优势特点

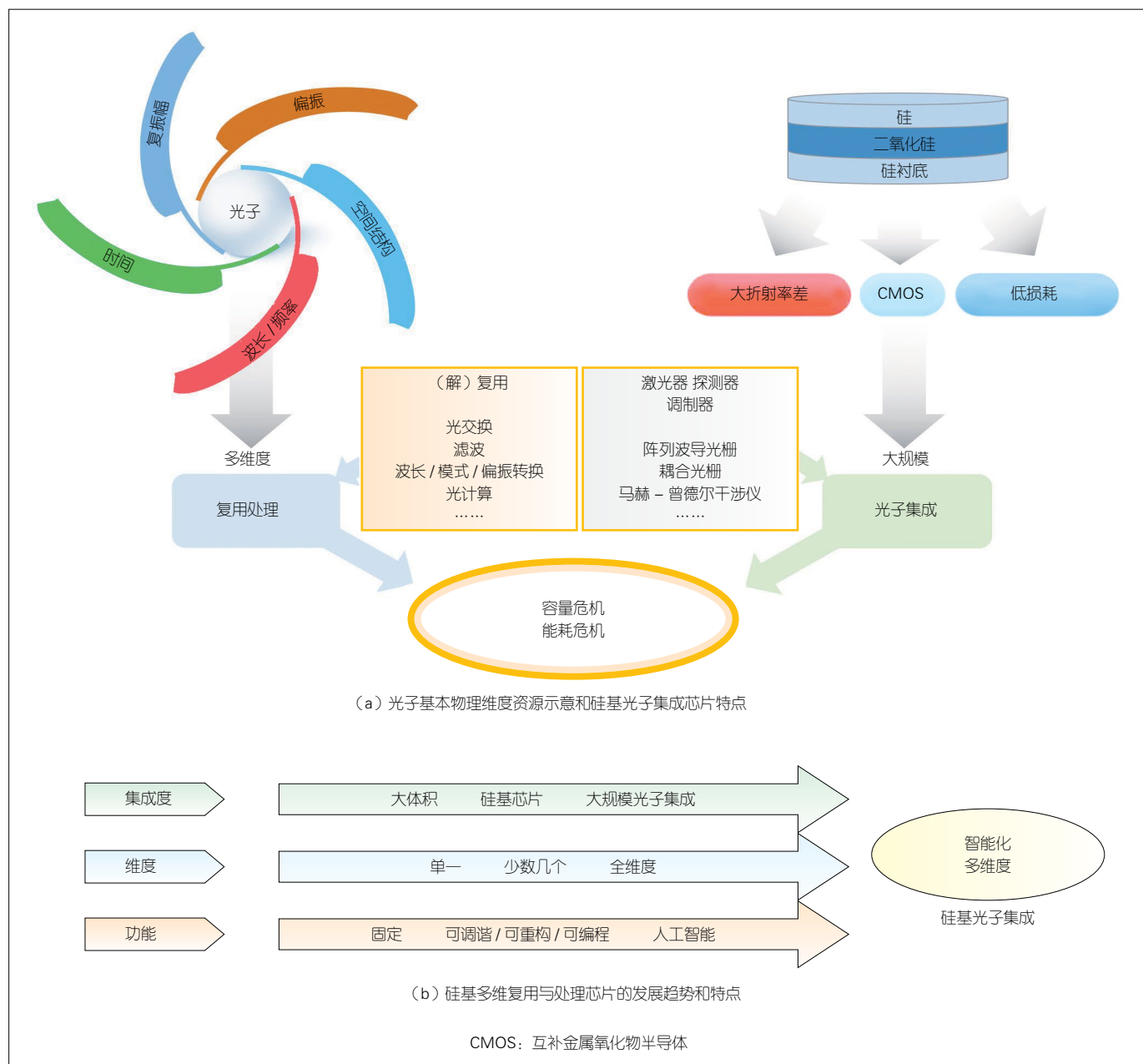
与光相关的应用几乎都是围绕光子的各个维度资源展开的。光最大的特点是具有多个维度。如图1(a)所示,光子的基本维度资源包括复振幅、波长/频率、时间、偏振以及空间域。在高速光通信中,围绕复振幅、波长、

时间、偏振维度分别开发了高阶调制格式、WDM、TDM、PDM技术。光子多维度复用和信号处理有望有效缓解当前的信息容量危机和能耗危机。光子多维复用传输技术的快速发展,对芯片上的光子多维复用和处理提出了新的要求。同时,近年来,硅基光子的发展非常迅速,部分产品已经商业化,这一方面得益于CMOS集成电路成熟的工艺;另一方面,硅基集成在集成度、功耗、损耗等性能指标上具有明显优势。经过近20年的发展,硅基光子集成芯片在单元结构(包括光栅、微环、阵列波导光栅等)、调制器、探测器、衰减器、偏振处理器上已经日渐成熟,为满足光通信系统中光子多维复用和处理的需求打下了坚实的基础<sup>[28-30]</sup>。

图1(b)总结了硅基光子集成芯片的发展趋势和特点。从集成度来看,早期的体元件逐渐被片上硅基集成器件替代,最终要实现的是集成光路(PICs),实现片上系统(SoC)。硅基集成芯片对光子复用和处理的维度也逐渐从单一维度发展为少数维度,并最终升级为全维度。这将极大地有助于整个光通信系统全维度资源的充分利用和发展。此外,硅基集成芯片的功能也将逐步从固定功能发展到可调谐、可重构、可编程,并最终实现芯片的高度智能化以处理更加复杂的任务<sup>[25-30]</sup>。

## 2 硅基光子单一维度复用和处理芯片

近年来,为了更好地匹配融合现有光通信系统,硅基光子集成芯片在单一维度的复用和处理上取得了很多研究成果。就WDM技术而言,实现波分的基本原理是利用光束干涉,具体又可分为双光束干涉以及多光束干涉。常见的波分复用器件有马赫-



▲图1 光子基本物理维度资源和硅基光子集成的发展趋势

曾德尔干涉仪 (MZI)、微环谐振器 (MRR) 以及阵列波导光栅 (AWG) 等<sup>[31-34]</sup>。其中, MZI 作为双光束干涉器件, 可以通过级联的方式实现平坦通带的滤波, 从而减小外界温度等对波长漂移的影响, 具有更高的容忍度; 而 MRR、AWG 等器件, 可以实现更窄带宽的滤波, 因此在多通道密集波长复用中发挥着重要的作用。

模式复用技术利用波导中的不同模式作为信息传输的载体, 其关键是激发波导中的不同高阶模式并加载到主干路波导中实现多种模式复用, 其关键器件是模式复用器, 用来实现从基模到高阶模的有效转换。模式复用器的实现方案有很多已被报道, 主要有多模干涉仪 (MMI) 结构、绝热模式演变耦合结构以及非对称耦合结构

等。由于 MMI 型模式复用器结构较为复杂, 不利于模式通道数的扩展, 而绝热模式演变耦合型对工艺误差较为敏感; 因此, 基于非对称耦合结构的模式复用器以其低串扰、低插损、大带宽等特点获得了广泛的应用<sup>[35-38]</sup>。除了片上波导模式复用之外, 硅光子集成芯片也可用来产生光纤或自由空间模式, 比如少模光纤内的线偏振

(LP)模式,自由空间中的矢量模式、OAM模式等<sup>[39-42]</sup>。

偏振态也是光的一个重要属性。对于硅波导而言,硅和包层空气或二氧化硅存在大折射率差,其双折射效应极为显著;因此,大多数硅波导器件均具有非常严重的偏振敏感特性。为实现片上PDM,近年来各种片上偏振分束器件(PBS)已被报道,包括耦合结构和亚波长结构等,为片上偏振复用系统的研究应用提供了基础<sup>[43-46]</sup>。

此外,硅基集成器件对高级调制格式的加载主要是依靠高速的、基于载流子色散效应的硅基调制器。一般常用的硅基调制器可分为两类:一类是基于微环谐振腔结构,另一类是基于MZI结构。这两类结构的优缺点也十分明显:微环调制所需的功耗低,但是带宽窄;MZI结构尺寸大(毫米级别),功耗大一些,可以实现宽带工作<sup>[47-50]</sup>。

硅基光子单一维度处理芯片,主要集中在波长、模式和偏振3个方面。波长维度的光信号处理在光通信中有着重要应用,全光的光谱滤波、波长转换以及波长选择性光开关等在WDM以及全光网络中有着重要作用<sup>[51-57]</sup>。硅基片上模式处理主要包括模式合成转换、模式过滤以及模式光开关等,为模分复用通信系统提供更大的灵活性<sup>[58-61]</sup>。硅基片上偏振处理器除了用于偏振复用的偏振分束器之外,还有偏振起偏器、偏振旋转器以及偏振旋转分束器<sup>[62-65]</sup>。

硅基光子单一维度复用和处理芯片走向实际应用的最大困难可能在于器件的性能。尽管从集成度上来看硅基光子集成具备优势,但是在有些情况下牺牲了器件的部分性能。以硅基AWG为例,在保证低损耗和低串扰的情况下,目前很难做到更多通道、更密集的WDM。针对模式和偏振复用,

片上更高阶的模式耦合和激发是一个难点,新兴的亚波长结构为此提供了新的设计方法。

### 3 硅基光子多维复用/解复用芯片

目前,WDM、PDM和MDM等单一维度复用/解复用技术均已应用于光通信,将多种复用方式综合运用还可形成多维复用技术,从而显著增加可用通道数和提高通信容量,这也是未来超大容量光通信/光互连的一个重要发展趋势;因此,与之相匹配的硅基光子多维复用/解复用芯片也受到了广泛关注。

#### 3.1 波长-模式混合复用/解复用

将多模式和多波长相互结合可以实现一种波长-模式的混合复用/解复用。根据前面提到的波分复用器以及模分复用器结构,一种简单的方案是将两种复用/解复用器结构相互级联,从而实现混合复用/解复用。如图2(a)所示的波长-模式混合复用/解复用器,它由一个基于级联非对称定向耦合器结构的4通道模式解复用器以及两个支持16波长通道的双向型AWG构成。4个模式和16个波长携带的64通道多维复用光信号,首先被4通道模式解复用器分成4组基模,每组均含有16个波长通道,然后分别从模式解复用器的单模输出波导出射并分别进入各自的波分解复用器,由此实现不同波长从不同输出端口输出。其中,模式解复用器引入的模式通道间串扰 $<-20$  dB;而AWG波分复用器引入的波长通道间串扰约为 $-14$  dB<sup>[66]</sup>。由于级联微环用于波分复用系统具有紧凑、低损耗以及低串扰等优势,另一种替代的方案是将模分复用器同阵列级联微环进行串联。基于非对称定向耦合器的4通道模式解复用器以及8通道级联微环方形滤波器,实现了模式串

扰约 $-20$  dB、波长串扰约 $-25$  dB的混合解复用<sup>[67]</sup>。除此之外,图2(b)提出了另外一种将微环波长复用器与定向耦合模式复用器混合兼容的方式,其利用单模微环谐振器来选择性地耦合多模波导中的不同模式。由于微环还可以支持多个波长复用通道,从而可以实现微环在不同波长下对模式的选择性耦合<sup>[68]</sup>。

#### 3.2 偏振-模式混合复用/解复用

片上两种不同偏振的高阶模式均可利用级联非对称定向耦合器结构来实现复用解复用,而不同偏振的复用解复用则可以通过偏振旋转器(PR)以及偏振分束器(PBS)等来实现;因此,偏振-模式的混合复用可先通过PR或PBS结构得到对应偏振下的基模,然后通过级联的非对称定向耦合器结构完成不同高阶模式的复用。已有报道中提到利用PBS演示了同时实现4个横磁模(TM)和6个横电模(TE)的10通道偏振-模式混合复用器,在 $1525 \sim 1610$  nm的大波长范围内具有约 $-10$  dB串扰<sup>[69]</sup>。同时,光纤内的不同偏振模式也可通过片上结构来实现复用解复用,如图2(c)所示,其利用5个紧密排放的小型二维垂直耦合光栅,可以实现对少模光纤的不同偏振共6个模式的激发或者检测<sup>[70]</sup>。除此之外,不同偏振的空间模式可通过片上光栅结构进行复用解复用,利用二维叠加全息叉形光栅结构,将波导中的平面导模耦合成为自由空间中的偏振多样性OAM模式,有望实现不同偏振下不同阶数的OAM模式复用<sup>[71]</sup>。

#### 3.3 偏振-波长混合复用/解复用

图2(d)展示了一种由PBS、PR以及AWG构成的偏振-波长混合解复用器。首先利用宽带PBS将入射光信号分为TE偏振及TM偏振两组,



每组都包含多个波长通道, 然后 TM 偏振光经过一个 PR 被旋转和转换成 TE 偏振, 最后这两组信号被分别输入到双向型 AWG 的两个输入波导进行多路波长解复用。这种混合解复用器件的性能分别由单一偏振以及波长解复用的性能决定, 实现了偏振消光比  $< -20$  dB, 波长串扰值约  $-13$  dB<sup>[72]</sup>。

### 3.4 模式 / 波长复用 - 复振幅高级调制格式

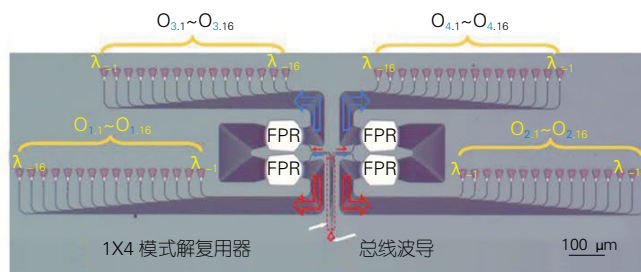
同时, 将混合多维复用技术与各种高级调制格式相结合, 可进一步提升光互连与光通信的容量。华中科技大学研究人员展示了一种模分复用技术结合高级调制格式的方案, 两通道的模分复用由光栅辅助的非对称耦

合器结构实现, 而调制格式则选择基于正交频分复用的偏置正交振幅调制 (OFDM/OQAM), 具有较高的旁瓣抑制率, 可以有效地进行高阶调制<sup>[73]</sup>。实验中, 利用双通道 MDM 加载 256-QAM 信号, 实现了 23.89 Gbit/s 的信息传输。此外, 利用波分复用系统加载高阶调制格式的方案也有报道。该方案通过利用两个级联 AWG 构成 16 个波长通道的 WDM 系统, 每个通道携带 10 Gbaud 的 16-QAM 信号, 演示了具有 640 Gbit/s 吞吐量的可编程光学滤波和上传下载<sup>[74]</sup>。

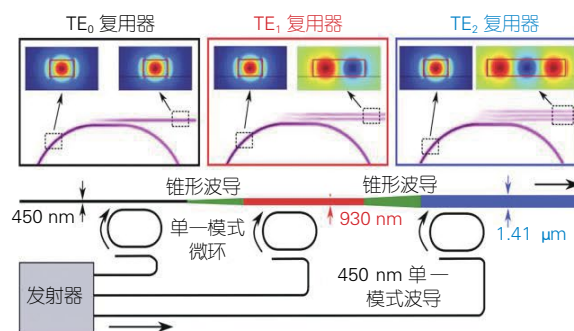
## 4 硅基光子多维处理芯片

近来针对混合多维复用信号的处理也引起了越来越多的关注, 主要集

中在多维复用光开关方面。目前用于大规模光开关阵列中的交换单元, 无论是 MRR 还是 MZI, 都是针对波导中的基模工作; 因此, 多维混合复用系统中通常需要将高阶模式解复用为 TE 偏振基模, 然后进行光交换处理。图 3 (a) 演示了一种偏振 - 模式混合的  $1 \times 2$  选择光开关, 利用 PBS 和非对称定向耦合器结构构成的支持 4 个 TE 偏振以及 4 个 TM 偏振模式的混合解复用器来实现共 8 个模式的解复用, 然后通过 MZI 光开关阵列以及级联的光交叉实现  $1 \times 2$  的路由选择, 其平均串扰值  $< -15$  dB<sup>[75]</sup>。基于类似工作原理并结合拓扑结构, 图 3 (b) 演示了一种可以实现两个偏振、两个模式的  $2 \times 2$  选择性光开关, 该结构利用 PBS

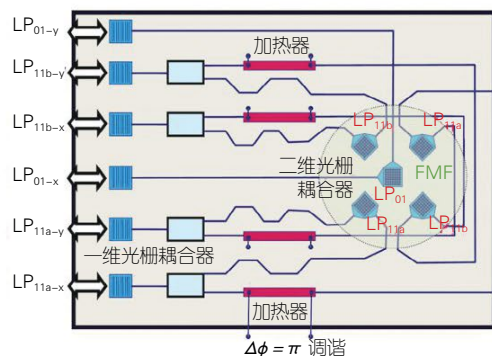
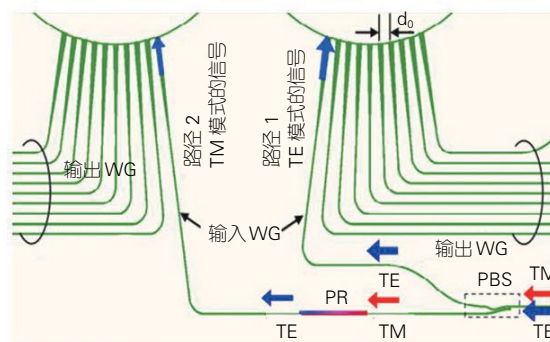


(a)



(b)

(a)、(b) 为片上波长 - 模式混合复用 / 解复用器件<sup>[66], [68]</sup>

(c) 片上偏振 - 模式混合复用 / 解复用器件<sup>[71]</sup>(d) 片上偏振 - 波长混合复用 / 解复用器件<sup>[72]</sup>

$d_0$ : 表示波导间距  
FMF: 少模光纤

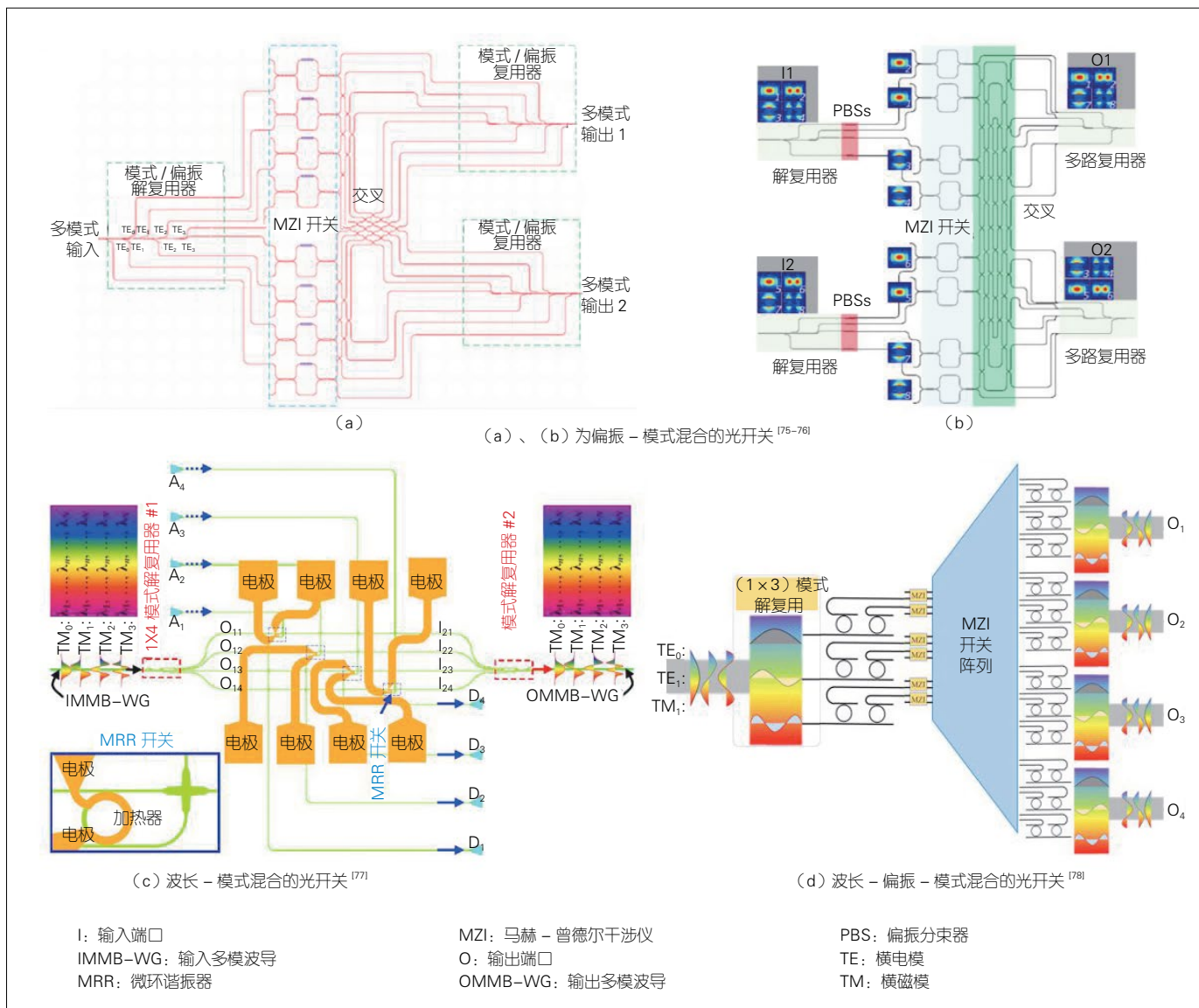
FPR: 自由传输区  
LP: 线偏振

PBS: 偏振分束器  
PR: 偏振旋转器

TE: 横电模  
TM: 横磁模

WG: 波导光栅

▲图 2 硅基光子多维复用 / 解复用器件



▲图3 硅基光子多维处理器件

来减小模间串扰。经实验验证,同一通道间不同偏振模式的模间串扰以及不同通道间同一偏振模式的模内串扰均为  $-23$  dB 左右<sup>[76]</sup>。对于混合 WDM-MDM 系统,可以通过模式复用解复用器件和阵列 MRR 光开关级联的方式实现多个波长和模式通道的选择性上传下载以及光切换,如图 3(c) 所示<sup>[77]</sup>。另外,同时针对波长、偏振、模式的光开关最近也开始有所报道,如图 3(d) 所示,其利用偏振 - 模式混合复用器以及级联微环进行混合信号复用,然后

利用 MZI 光开关阵列实现通道交换<sup>[78]</sup>。目前,多维混合复用光信号处理尚处于初始研究阶段,针对波长、偏振、模式的大规模无阻塞光开关阵列以及更多混合信号处理功能仍是个不小的挑战。特别地,光纤模式复用与芯片上模式复用的对接和融合是一个难点。目前,大多研究工作集中在利用硅基光子集成芯片实现对光纤多个模式的解复用,但还未实现光纤内模式与芯片上模式的一一对应耦合;因此,该工作还需进一步探索。

硅基光子集成芯片大多是针对某些特定应用的场景,如微环谐振腔、非对称 MZI、光开关阵列等都需要特定的设计,然后再制备出来。从电子的“现场可编程门阵列(FPGA)”借鉴思路,能够在硅基光子集成平台上制备出类似的可编程光“FPGA”结构。图 4 所示是基于六边形结构的光“FPGA”,该结构的基本单元是由单个可调的 MZI 构成。通过该阵列,可以路由光在片上的传输路径,构建不同的功能性器件,包括微环结构、MZI

结构、光开关阵列、延时线等<sup>[79-83]</sup>。

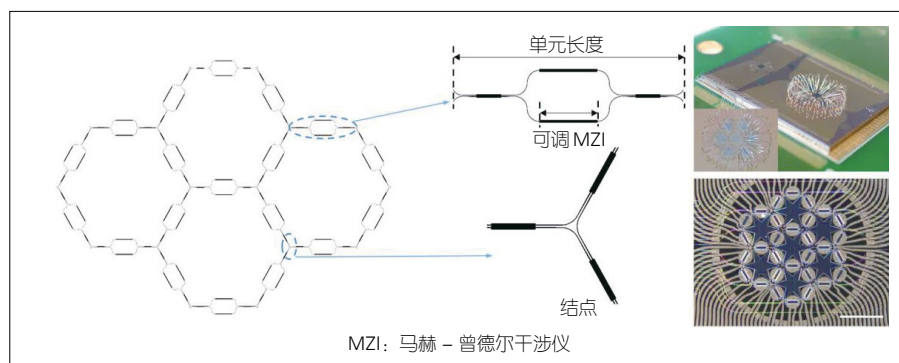
## 5 硅基光子集成芯片与人工智能

近年来,人工智能再度兴起,其中,深度学习、神经网络、大数据处理应用更加广泛。同时,随着硅基光子集成器件的逐步成熟,需要新的技术来与硅基芯片进行进一步融合。这些均为硅基光子集成芯片与人工智能的融合提供了契机。一方面,硅基集成芯片的技术已经成熟,另一方面,相比于电子,光子在传输、功耗等方面具备绝对优势;因此,近年来针对硅基芯片与人工智能的研究越来越多,这推动了硅基光子集成器件从单一功能、可调谐、可重构到智能化方向发展

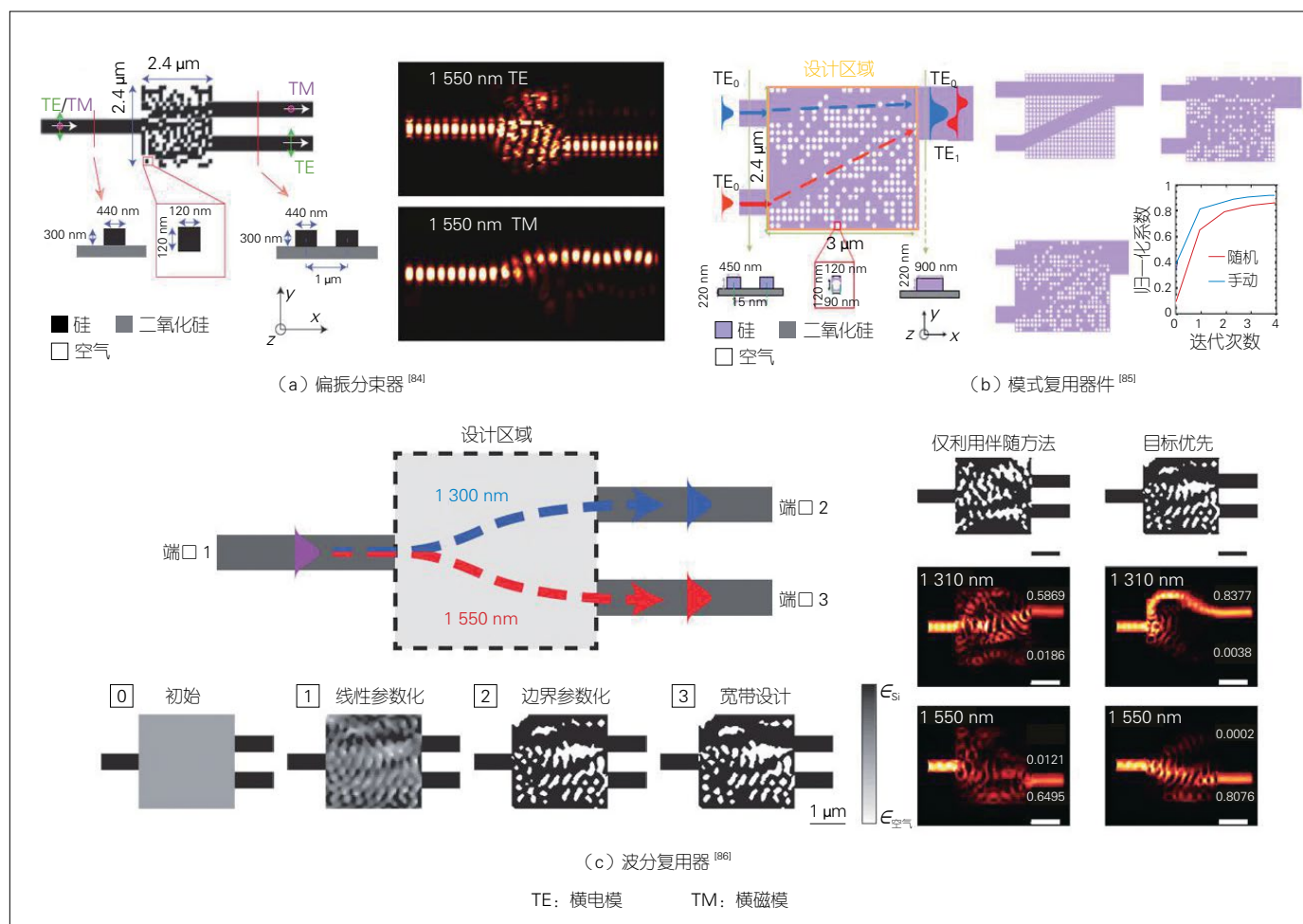
展<sup>[25-27]</sup>,其中,包括硅光子芯片的算法优化、硅光子芯片上的深度学习、片上神经网络模拟等。这些研究为硅基光子集成芯片的发展提供了新的方向,也为进一步实际应用提供了更丰富的选择。

### 5.1 光子集成器件的常规算法优化

图5(a)为一款超小紧凑的集成光学偏振分束器,该器件的尺寸仅为 $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$ 。将器件离散化为400个 $120 \text{ nm} \times 120 \text{ nm}$ 的方块,可称之为像素。每个这样的像素有两种状态:



▲图4 硅基光子可编程处理器件<sup>[80]</sup>



▲图5 基于常规算法优化的硅基光子集成器件<sup>[84-86]</sup>

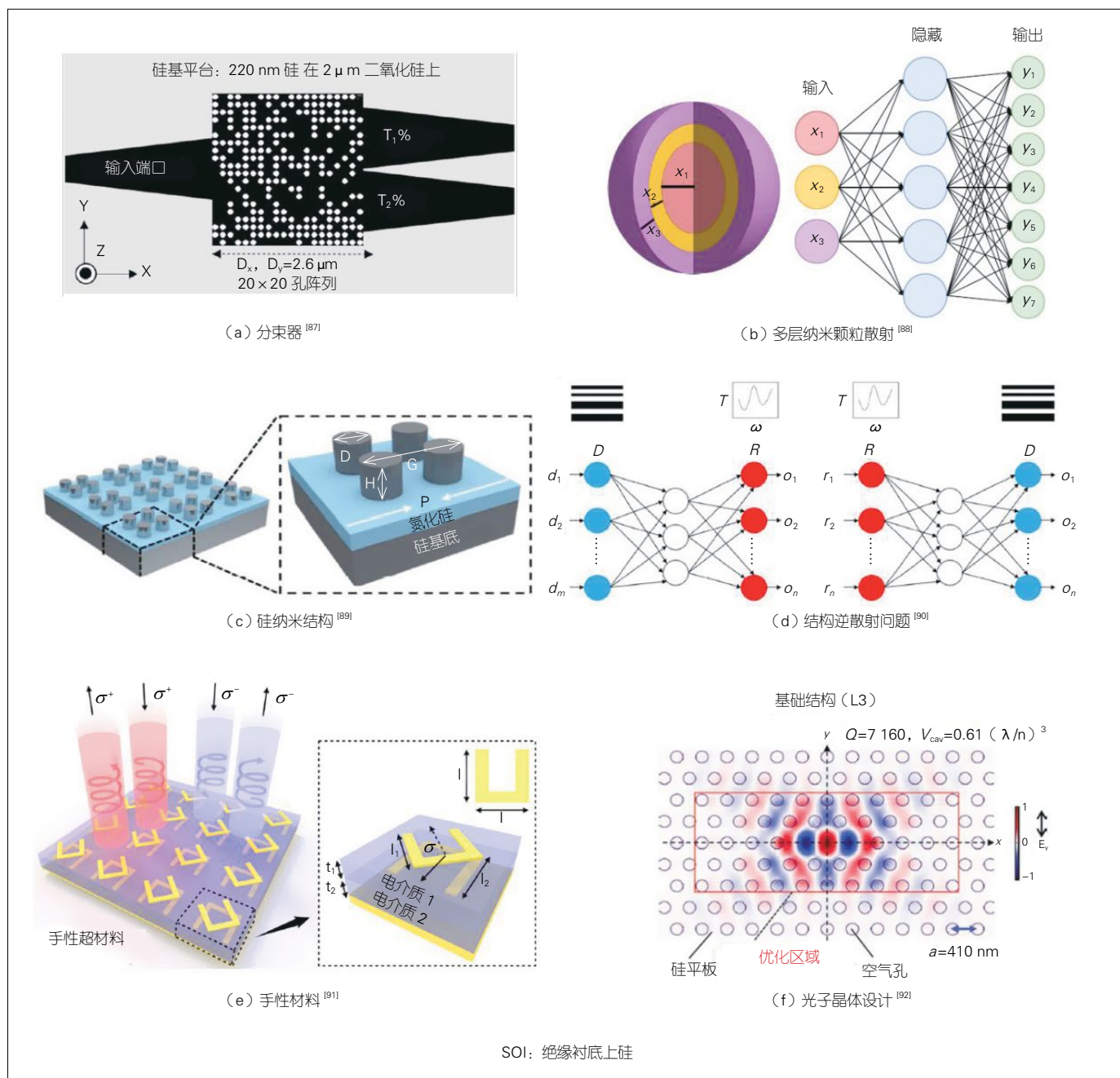


硅或空气。通过使用一个非线性优化算法（二值化直接搜索）进行优化，该器件的工作波段可处于 1 550 nm。具体方法为：首先，一个随机选择的像素被选择为刻蚀，然后计算其输出结果（这里是两个偏振的平均透射效率），如果这个平均透射效率有提高，那么这个像素就确定为刻蚀，如果没

有提高就不刻蚀。如此循环迭代很多次后，偏振分束器的性能接近最佳。实验制作中，输入输出波导以及核心器件的刻蚀仅需要一次，不需要套刻。器件的平均传输效率超过 70%，消光比超过 10 dB，工作带宽为 32 nm。仿真中，该器件在波导厚度上的工艺误差在  $\pm 20 \text{ nm}$ <sup>[84]</sup>。该结构为微纳光子集

成器件的设计提供了一种可选择的思路；但算法不够智能且计算较为复杂，一旦器件尺寸变大，像素增多就使得计算量急剧增大。

图 5 (b) 为硅基超紧凑模式复用器件，它同样通过二值化直接搜索算法实现 2 个模式和 3 个模式的复用和解复用。不同在于，工艺上刻蚀像素单元是



▲图 6 神经网络结构优化的光子集成器件<sup>[87-92]</sup>

圆孔形状,而不是之前的方形<sup>[85]</sup>。图5(c)为基于另一种算法优化的硅基波分复用器。采用粒子群优化(PSO)与时域有限差分(FDTD)相结合的方法进行优化设计<sup>[86]</sup>,这种方法已被证明在设计紧凑、多参数光学器件方面具有强大能力,文中紧凑、超低损耗、中心波长分别在1 550 nm和1 310 nm的波长解复用器得以设计和验证。

### 5.2 光子集成器件的人工智能优化

除优化算法外,近几年来,深度学习也被引入光子集成器件的设计中。图6(a)是通过深度神经网络(DNN)来优化设计的分束器。按不同层的位置划分,DNN内部的神经网络层可分为输入层、隐藏层和输出层。一般第一层是输入层,最后一层是输出层,中间的层数都是隐藏层。层与层之间是全连接的,即第*i*层的任意一个神经元一定与第*i+1*层的任意一个神经元相连<sup>[87]</sup>。反向传播算法(BP)是DNN学习中一个非常关键的过程,由正向传播和反向传播组成。在正向传播过程中,输入信息通过输入层、经隐藏层逐层处理并传向输出层。如果在输出层得不到期望的输出值,则取输出结果与样本标签误差的平方和作为目标函数,转入反向传播。通过对损失函数用梯度下降法进行迭代优化求极小值,找到合适的输出层和隐藏层对应的线性系数矩阵 $\mathbf{W}$ 和偏置向量 $\mathbf{b}$ ,网络的学习在权值修改过程中完成,误差达到所期望值时,学习结束。图6(a)所示的分束器经DNN优化后,端口反射率低于-20 dB,透射率超过90%。图6(b)提出了一种利用人工神经网络来模拟多层纳米颗粒光散射的方法。结果发现,网络只需要对数据进行小样本的训练就可以近似地模拟高精度的数据。一旦神经网络被训练,它可以比传统方法更快地模拟这种光学

过程<sup>[88]</sup>。图6(c)中,双向的DNN被用于产生精准的硅纳米结构颜色。硅纳米结构颜色的印刷分辨率和色域都比sRGB高<sup>[89]</sup>。精确的颜色是由纳米结构的局部磁偶极和电偶极共振决定的,它们对其几何变化非常敏感。通常情况下,特定颜色的设计和几何参数的迭代优化需要非常大的计算量,而获得数百万种不同的结构颜色是一个挑战。在这里,通过训练一个深度神经网络,可以准确地预测正演模拟过程中随机硅纳米结构产生的颜色,并解决反向设计过程中的非均匀性问题,该方法可以精确输出至少100万种不同颜色。研究表明,深度学习是降低纳米计算成本和最大化设计效率的有力工具,可以很好地指导硅结构颜色生成。图6(d)中,利用神经网络进行逆设计存在非均匀性是逆散射问题中的一个典型问题。该问题使得在一个大的训练数据集上训练神经网络变得非常困难,而这个大的训练数据集通常需要对复杂的光结构进行建模。将正向建模和反向设计结合在一个串联的网络中可以克服这一问题,使包含非均匀电磁散射实例的数据集能够有效训练深层神经网络<sup>[90]</sup>。此外,如图6(e)和6(f)所示,深度学习和神经网络被进一步用于手性超材料和高Q值的光子晶体L3纳米腔体的设计,均获得不错的效果<sup>[91-92]</sup>。

### 5.3 硅基光子集成芯片上的人工智能实现

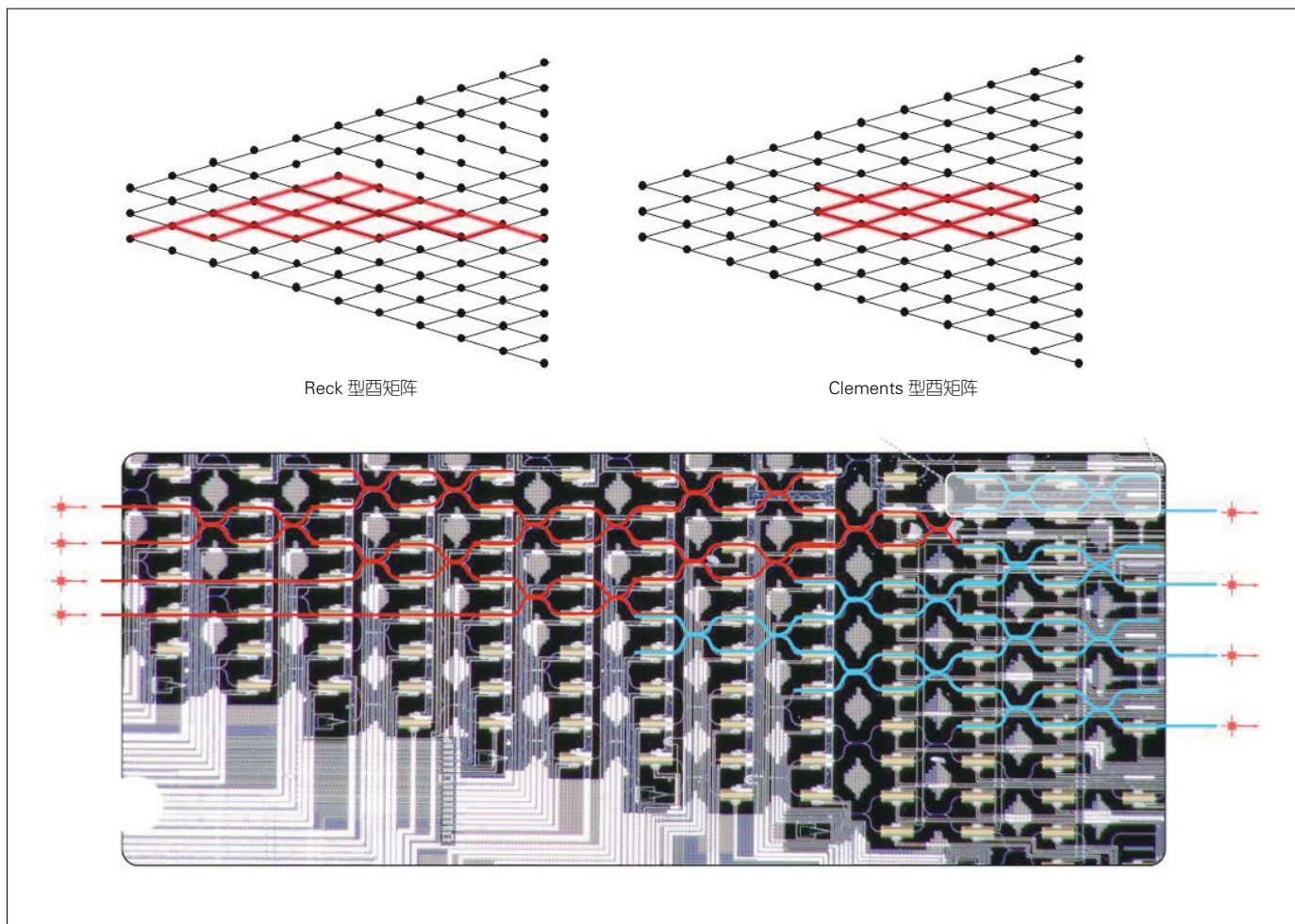
除通过算法(包括常规算法和深度学习、神经网络等相关算法)对硅基等微纳光子器件的设计和优化之外,人工智能(包括深度神经网络和类真实神经网络的结构等)硅基光子集成芯片也得以实现<sup>[93-99]</sup>。硅基光子集成芯片上的许多功能器件都基于光场的干涉效应,其中MZI结构最为常见。在2017年,美国麻省理工学院学者报

道了一个全光人工神经网络结构(非线性计算模块在片外实现),用于实现语音识别的深度神经网络<sup>[93]</sup>。如图7所示,该硅基阵列结构是一个2层全光神经网络结构,由56个可热调的MZI单元组成,并有4个输入和4个输出端口。一个任意的实值矩阵均可以通过奇异值分解(SVD)方法来获得,即 $\mathbf{M}=\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$ ,其中 $\mathbf{U}$ 为酉矩阵, $\mathbf{V}^T$ 为酉矩阵 $\mathbf{V}$ 的复共轭, $\mathbf{\Sigma}$ 为对角矩阵。片上酉矩阵的制备可以通过Reck或Clements型MZI阵列来实现,对角矩阵可通过光衰减器来实现;因此,每层均是一个可任意重构的矩阵<sup>[94]</sup>。另外,针对两层之间的非线性单元,可利用常见的光学非线性来实现,比如饱和吸收、双稳态等。

在实验中,为准备训练和测试数据集,有360个数据点被使用,每个数据点由一个音素的4个对数面积比系数组成。对数面积比系数或特征向量表示在不同对数间隔的频带中包含的功率,可通过计算傅里叶语音信号乘以汉明窗函数的变换来表示。这360个数据点来自90个人的采样(每个人说4种不同的元音),其中一半的数据点用于训练和学习,另一半用于测试该训练过的全光人工神经网络,可在传统的计算机上使用随机梯度下降法和标准反向传播算法训练全光神经网络中的矩阵参数。片上人工神经网络在计算速度和功耗上均具备优势,可满足大数据处理的高速和低功耗需求。

近年来,越来越多的研究集中在寻找新的“神经形态计算”架构来模拟大脑同时处理和信息存储的能力。因为在真实的大脑中,神经元突触比神经元在数量上多出很多数量级,实现模拟突触功能的硬件设备是第一步也是必不可少的一步。使用纯光学手段有很多好处,包括超快的运行速





▲图7 硅基光子集成芯片用于深度学习<sup>[93]</sup>

度、几乎无限的带宽以及很小的功率损失。基于相变材料和集成器件的光子神经形态计算也是一个非常有前景的方法<sup>[95]</sup>。很多报道已经证明这些材料和器件具有内在的能力，能够在硬件上提供神经元的基本集成和激发功能以及突触的塑性加权操作。2019年业界报道了第一个可用于构建尖峰神经网络的全光集成和可扩展神经形态框架，并证明该系统能够完成典型的人工智能模式识别任务<sup>[96]</sup>。此外，该系统的训练和学习包括有监督和无监督两种方式，这两种方式具有不同的学习规则，都有广泛的应用场景。基于波分复用技术，该片上集成系统包含4个神经元和60个突出（共计140

个光学元件）。在实验中，该神经突触网络结构被成功应用于字母识别。

除了硅基片上神经网络结构的实现，自由空间中的衍射深度神经网络结构同样被用于深度学习中，包括3D打印的衍射深度神经网络和傅里叶空间衍射深度神经网络<sup>[97]</sup>。其中，傅里叶空间衍射深度神经网络是通过在傅里叶平面放置简单的衍射调制层来实现的，另外光学非线性是通过铁电薄膜引入的，上述方案的优势在于方案简单和光速的处理速度<sup>[98]</sup>。

## 6 总结和展望

通过对近年来智能硅基多维复用与处理芯片研究进展的简要回顾，可

以看到，从光子的多维度资源出发，硅基芯片上的复用从单一维度逐步发展为多个维度，芯片的处理功能也从单一波长维度逐渐发展为多个维度。以光子多个维度资源为基础，硅基光子集成平台和技术提供了强有力的支撑，在多维复用和处理上取得了很多成果。此外，随着大数据和人工智能时代的到来，智能算法也为硅基芯片的设计提供了新的思路，如新型超紧凑的模式复用器、波分器件、偏振器件等。硅基光子集成芯片实现人工智能是近年来的热点，一方面硅基光子集成工艺和技术日渐成熟，另一方面光子的传输和处理比电子更具优势。目前，已有多种结构被用于实现片上



的深度神经网络或模拟真实大脑神经网络结构,均取得不错的效果。

为进一步满足全维度光通信系统对多维复用和处理的需求,硅光子集成芯片需要进一步融合多维度资源,实现片上全维度的复用和处理。与此同时,紧密结合锗、Ⅲ-V族有源材料、相变材料、铌酸锂(薄膜)等,将进一步助于实现更丰富的光信号处理;紧密结合各种先进算法,实现对现有集成功能器件的进一步改进和优化;紧密结合人工智能等,实现全光片上神经网络结构的制备,探索全光计算,以在部分计算领域替代传统电子计算。

#### 参考文献

- [1] SOREF R, LARENZO 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. DOI:10.1109/jqe.1986.1073057
- [2] SOREF R, BENNETT B. Electrooptical Effects in Silicon[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 123-129. DOI:10.1109/jqe.1987.1073206
- [3] SOREF R. The Past, Present, and Future of Silicon Photonics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6): 1678-1687. DOI:10.1109/jstqe.2006.883151
- [4] JALALI B, FATHPOUR S. Silicon Photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4600-4615. DOI:10.1109/jlt.2006.885782
- [5] 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. DOI:10.1038/nature02310
- [6] XU Q F, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre-Scale Silicon Electro-Optic Modulator[J]. Nature, 2005, 435(7040): 325-327. DOI:10.1038/nature03569
- [7] ZHU Y X, ZHANG F, YANG F, et al. Toward Single Lane 200G Optical Interconnects with Silicon Photonic Modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 38(1): 67-74. DOI:10.1109/jlt.2019.2944762
- [8] COLACE L, MASINI G, ASSANTO G, et al. Efficient High-Speed Near-Infrared Ge Photodetectors Integrated on Si Substrates[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(10): 1231-1233. DOI:10.1063/1.125993
- [9] MICHEL J, LIU J F, KIMERLING L C. High-Performance Ge-on-Si Photodetectors[J]. Nature Photonics, 2010, 4(8): 527-534. DOI:10.1038/nphoton.2010.157
- [10] SCHALL D, PALLECCHI E, DUCOURNAU G, et al. Record High Bandwidth Integrated Graphene Photodetectors for Communication beyond 180 Gb/s[C]//Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2018. DOI:10.1364/ofc.2018.m2i.4
- [11] QIAN D Y, HUANG M F, IP E, et al. High Capacity/Spectral Efficiency 101.7-Tb/s WDM Transmission Using PDM-128QAM-OFDM over 165-km SSMF within C- And L-Bands[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(10): 1540-1548. DOI:10.1109/jlt.2012.2189096
- [12] Winzer P J. Modulation and Multiplexing in Optical Communication Systems [J]. IEEE LEOS Newsletter, 2009, 23: 4-10. DOI: 10.1364/CLEO.2009.CTuL3
- [13] ZHOU X, YU J J. Multi-Level, Multi-Dimensional Coding for High-Speed and High-Spectral-Efficiency Optical Transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(16): 3641-3653. DOI:10.1109/jlt.2009.2022765
- [14] RICHTER T, PALUSHANI E, SCHMIDT-LANGHORST C, et al. Transmission of Single-Channel 16-QAM Data Signals at Terabaud Symbol Rates[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 30(4): 504-511. DOI:10.1109/jlt.2011.2174029
- [15] WINZER P J, GNAUCK A H, DOERR C R, et al. Spectrally Efficient Long-Haul Optical Networking Using 112-Gb/s Polarization-Multiplexed 16-QAM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 547-556. DOI:10.1109/jlt.2009.2031922
- [16] OLSSON S L I, CHO J, CHANDRASEKHAR S, et al. Probabilistically Shaped PDM 4096-QAM Transmission over up to 200 km of Fiber Using Standard Intradyne Detection[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4522-4530. DOI:10.1364/oe.26.004522
- [17] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-Division Multiplexing in Optical Fibers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362. DOI:10.1038/nphoton.2013.94
- [18] LI G F, BAI N, ZHAO N B, et al. Space-Division Multiplexing: The next Frontier in Optical Communication[J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 414-487. DOI:10.1364/aop.6.000413
- [19] WINZER P J. Making Spatial Multiplexing a Reality[J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 345-348. DOI:10.1038/nphoton.2014.58
- [20] WANG J. Advances in Communications Using Optical Vortices[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): B14. DOI:10.1364/prj.4.000b14
- [21] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit Free-Space Data Transmission Employing Orbital Angular Momentum Multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488-496. DOI:10.1038/nphoton.2012.138
- [22] ZHU L, ZHU G X, WANG A D, et al. 18 km Low-Crosstalk OAM+WDM Transmission with 224 Individual Channels Enabled by a Ring-core Fiber with Large High-order Mode Group Separation[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1890-1893. DOI:10.1364/ol.43.001890
- [23] WANG J, LONG Y. On-Chip Silicon Photonic Signaling and Processing: a Review[J]. Science Bulletin, 2018, 63(19): 1267-1310. DOI:10.1016/j.scib.2018.05.038
- [24] WANG J, LONG Y. Silicon-Based Nonlinear Optical Signal Processing[M]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2018. DOI:10.1117/3.2502179
- [25] FERREIRA DE LIMA T, SHASTRI B J, TAIT A N, et al. Progress in Neuromorphic Photonics[J]. Nanophotonics, 2017, 6(3): 577-599. DOI:10.1515/nanoph-2016-0139
- [26] PENG H T, NAHMIAS M A, DE LIMA T F, et al. Neuromorphic Photonic Integrated Circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(6): 1-15. DOI:10.1109/jstqe.2018.2840448
- [27] YAO K, UNNI R, ZHENG Y B. Intelligent Nanophotonics: Merging Photonics and Artificial Intelligence at the Nanoscale[J]. Nanophotonics, 2019, 8(3): 339-366. DOI:10.1515/nanoph-2018-0183
- [28] WANG J. Chip-Scale Optical Interconnects and Optical Data Processing Using Silicon Photonic Devices[J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(2): 353-372. DOI: 10.1007/s11107-015-0525-z
- [29] DAI D X, BAUTERS J, BOWERS J E. Passive Technologies for Future Large-Scale Photonic Integrated Circuits on Silicon: Polarization Handling, Light Non-Reciprocity and Loss Reduction[J]. Light: Science & Applications, 2012, 1(3): e1. DOI:10.1038/lsa.2012.1
- [30] DONG P, CHEN Y K, DUAN G H, et al. Silicon Photonic Devices and Integrated Circuits[J]. Nanophotonics, 2014, 3(4/5): 215-228. DOI:10.1515/nanoph-2013-0023
- [31] HORST F, GREEN W M J, 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. DOI:10.1364/oe.21.011652
- [32] DONG P. Silicon Photonic Integrated Circuits for Wavelength-Division Multiplexing Applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 370-378. DOI:10.1109/jstqe.2016.2575358
- [33] CHEN S T, FU X, WANG J, et al. Compact Dense Wavelength-Division (De)Multiplexer Utilizing a Bidirectional Arrayed-Waveguide Grating Integrated with a Mach-Zehnder Interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(11): 2279-2285. DOI:10.1109/jlt.2015.2405510
- [34] DAI D X, FU X, SHI Y C, et al. Experimental Demonstration of an Ultracompact Si-Nanowire-Based Reflective Arrayed-Waveguide Grating (de)Multiplexer with Photonic Crystal Reflectors[J]. Optics Letters, 2010, 35(15): 2594-2596. DOI:10.1364/ol.35.002594
- [35] DING Y H, XU J, DA ROS F, et al. On-Chip Two-Mode Division Multiplexing Using Tapered Directional Coupler-based Mode Multiplexer and Demultiplexer[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10376-10382. DOI:10.1364/oe.21.010376
- [36] XU L H, WANG Y, MAO D, et al. Ultra-Broadband and Compact Two-Mode Multiplexer

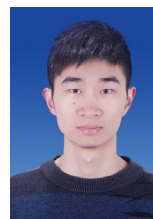
- Based on Subwavelength-Grating-Slot-Assisted Adiabatic Coupler for the Silicon-on-Insulator Platform[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(23): 5790–5800. DOI:10.1109/jlt.2019.2939260
- [37] HE Y, ZHANG Y, ZHU Q M, et al. Silicon High-Order Mode (De)Multiplexer on Single Polarization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5746–5753. DOI:10.1109/jlt.2018.2878529
- [38] DAI D X, LI C L, WANG S P, et al. 10-Channel Mode (de)Multiplexer with Dual Polarizations[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(1): 1700109. DOI:10.1002/lpor.201700109
- [39] CAI X, WANG J, STRAIN M J, et al. Integrated Compact Optical Vortex Beam Emitters[J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363–366. DOI:10.1126/science.1226528
- [40] XIE Z W, LEI T, LI F, et al. Ultra-Broadband On-Chip Twisted Light Emitter for Optical Communications[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(4): 18001. DOI:10.1038/lsa.2018.1
- [41] ZHOU N, ZHENG S, CAO X P, et al. Generating and Synthesizing Ultrabroadband Twisted Light Using a Compact Silicon Chip[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3140–3143. DOI:10.1364/ol.43.003140
- [42] ZHENG S, WANG J. On-Chip Orbital Angular Momentum Modes Generator and (de)Multiplexer Based on Trench Silicon Waveguides[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18492–18501. DOI:10.1364/oe.25.018492
- [43] CHEN S T, WU H, DAI D X. High Extinction-Ratio Compact Polarisation Beam Splitter on Silicon[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(12): 1043–1045. DOI:10.1049/el.2016.0683
- [44] KIM Y, LEE M H, KIM Y, et al. High-Extinction-Ratio Directional-Coupler-Type Polarization Beam Splitter with a Bridged Silicon Wire Waveguide[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3241–3244. DOI:10.1364/ol.43.003241
- [45] TIAN Y, QIU J F, LIU C, et al. Compact Polarization Beam Splitter with a High Extinction Ratio over S+C+L Band[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 999–1009. DOI:10.1364/oe.27.000999
- [46] XU H N, DAI D X, SHI Y C. Metamaterial Polarization Beam Splitter: Ultra-Broadband and Ultra-Compact On-Chip Silicon Polarization Beam Splitter by Using Hetero-Anisotropic Metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(4): 1970021. DOI:10.1002/lpor.201970021
- [47] 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): 109–116. DOI:10.1364/prj.6.000109
- [48] SAMANI A, PATEL D, CHAGNON M, et al. Experimental Parametric Study of 128 Gb/s PAM-4 Transmission System Using a Multi-Electrode Silicon Photonic Mach Zehnder Modulator[J]. *Optics express*, 2017, 25(12): 13252–13262. DOI: 10.1364/OE.25.013252
- [49] SUN J, SAKIB M, DRISCOLL J, et al. A 128 Gb/s PAM4 Silicon Microring Modulator[C]//Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers. San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2018: 1–3. DOI:10.1364/ofc.2018.th4a.7
- [50] NISHI H, TSUCHIZAWA T, WATANABE T, et al. Monolithic Integration of a Silica-Based Arrayed Waveguide Grating Filter and Silicon Variable Optical Attenuators Based on P-i-n Carrier-Injection Structure[J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(10): 102203. DOI:10.1143/apex.3.102203
- [51] ZHENG S, RUAN Z S, GAO S Q, et al. Compact Tunable Electromagnetically Induced Transparency and Fano Resonance on Silicon Platform[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25655–25662. DOI:10.1364/oe.25.025655
- [52] DING Y H, PU M H, LIU, et al. Bandwidth and Wavelength-Tunable Optical Bandpass Filter Based on Silicon Microring-MZI Structure[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6462–6470. DOI:10.1364/oe.19.006462
- [53] ZHOU N, ZHENG S, LONG Y, et al. Reconfigurable and Tunable Compact Comb Filter and (de)interleaver on Silicon Platform[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4358–4369. DOI:10.1364/oe.26.004358
- [54] HU X, LONG Y, JI M X, et al. Graphene-Silicon Microring Resonator Enhanced All-Optical up and down Wavelength Conversion of QPSK Signal[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7168–7177. DOI:10.1364/oe.24.007168
- [55] LONG Y, LIU J, HU X, et al. All-Optical Multi-Channel Wavelength Conversion of Nyquist 16 QAM Signal Using a Silicon Waveguide[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5475–5478. DOI:10.1364/ol.40.005475
- [56] ZHANG L, TAN X F, YANG M, et al. On-Chip Wavelength-Routed Photonic Networks with Comb Switches[C]//The 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP). San Diego, USA: IEEE, 2012: 279–281. DOI:10.1109/group4.2012.6324159
- [57] CHENG Q X, DAI L Y, ABRAMS N C, et al. Ultralow-Crosstalk, Strictly Non-Blocking Microring-Based Optical Switch[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 155–161. DOI:10.1364/prj.7.000155
- [58] CHENG Z, WANG J, YANG Z Y, et al. Sub-Wavelength Grating Assisted Mode Order Converter on the SOI Substrate[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34434–34441. DOI:10.1364/oe.27.034434
- [59] ZHENG S, CAO X P, KE Z W, et al. Experimental Demonstration of High-Order Modes Synthesis, Switch and Multicasting by Using Cascaded Y-Splitters on a Silicon Platform[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). Rome. IEEE, 2018: 1–3. DOI:10.1109/ecoc.2018.8535572
- [60] GUAN X W, DING Y H, FRANSEN L H. Ultra-Compact Broadband Higher Order-Mode Pass Filter Fabricated in a Silicon Waveguide for Multimode Photonics[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3893–3896. DOI:10.1364/ol.40.003893
- [61] YANG L, ZHOU T, JIA H, et al. General Architectures for On-Chip Optical Space and Mode Switching[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 180–187. DOI:10.1364/optica.5.000180
- [62] GUAN X W, CHEN P X, CHEN S T, et al. Low-loss Ultracompact Transverse-Magnetic-Pass Polarizer with a Silicon Subwavelength Grating Waveguide[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4514–4517. DOI:10.1364/ol.39.004514
- [63] XU H N, DAI D X, SHI Y C. Anisotropic Metamaterial-Assisted All-Silicon Polarizer with 415-nm Bandwidth[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(12): 1432–1439. DOI:10.1364/prj.7.001432
- [64] XIE A B, ZHOU L J, CHEN J P, et al. Efficient Silicon Polarization Rotator Based on Mode-Hybridization in a Double-Stair Waveguide[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 3960–3970. DOI:10.1364/oe.23.003960
- [65] SACHER W D, BARWICZ T, TAYLOR B J F, et al. Polarization Rotator-splitters in Standard Active Silicon Photonics Platforms[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3777–3786. DOI:10.1364/oe.22.003777
- [66] DAI D X, WANG J, CHEN S T, et al. Monolithically Integrated 64-Channel Silicon Hybrid Demultiplexer Enabling Simultaneous Wavelength- And Mode-Division-Multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(3): 339–344. DOI:10.1002/lpor.201400446
- [67] TAN Y, WU H, WANG S P, et al. Silicon-Based Hybrid Demultiplexer for Wavelength- And Mode-Division Multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(9): 1962–1965. DOI:10.1364/ol.43.001962
- [68] LUO L W, OPHIR N, CHEN C P, et al. WDM-Compatible Mode-Division Multiplexing on a Silicon Chip[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3069. DOI:10.1038/ncomms4069
- [69] DAI D X, WANG J, SHI Y C. Silicon Mode (de) Multiplexer Enabling High Capacity Photonic Networks-on-Chip with a Single-Wavelength-Carrier Light[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1422–1424. DOI:10.1364/ol.38.001422
- [70] CHEN H S, VAN UDEN R, OKONKWO C, et al. Compact Spatial Multiplexers for Mode Division Multiplexing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31582–31594. DOI:10.1364/oe.22.031582
- [71] ZHOU N, ZHENG S, CAO X P, et al. Ultra-Compact Broadband Polarization Diversity Orbital Angular Momentum Generator with  $3.6 \times 3.6 \mu\text{m}^2$  Footprint[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaau9593. DOI:10.1126/sciadv.aau9593
- [72] CHEN S T, SHI Y C, HE S L, et al. Compact Monolithically-Integrated Hybrid (de) multiplexer Based on Silicon-on-Insulator Nanowires for PDM-WDM Systems[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12840–12849. DOI:10.1364/oe.23.012840
- [73] GUI C C, GAO Y, ZHANG Z L, et al. On-Chip Silicon Two-Mode (De)Multiplexer for OFDM/OQAM Data Transmission Based on Grating-Assisted Coupler[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1–7. DOI:10.1109/jphot.2015.2506339
- [74] ZHENG S, LONG Y, GAO D S, et al. Chip-Scale Reconfigurable Optical Full-Field Manipulation: Enabling a Compact Grounding Photonic Signal Processor[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(5): 1235–1245. DOI: 10.1021/acs-photonics.0c00103
- [75] ZHANG Y, ZHU Q M, HE Y, et al. Silicon  $1 \times 2$  Mode- And Polarization-Selective Switch[C]//Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2017. DOI:10.1364/ofc.2017.w4e.2
- [76] ZHANG Y, HE Y, ZHU Q M, et al. On-Chip Silicon Photonic  $2 \times 2$  Mode- And Polarization-Selective Switch with Low Inter-Modal Crosstalk[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 521–526. DOI:10.1364/prj.5.000521
- [77] WANG S P, FENG X L, GAO S M, et al. On-

- Chip Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer for Hybrid Wavelength/Mode-Division-Multiplexing Systems[J]. Optics Letters, 2017, 42(14): 2802-2805. DOI:10.1364/ol.42.002802
- [78] CAO X, ZHENG S, WANG J. Demonstration of on-Chip  $1 \times 4$  Selective Switch with Simultaneous Mode-and Wavelength-Division-Multiplexing. 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), 99.
- [79] ZHUANG L M, ROELOFFZEN C G H, HOEKMAN M, et al. Programmable Photonic Signal Processor Chip for Radiofrequency Applications[J]. Optica, 2015, 2(10): 854-859. DOI:10.1364/optica.2.000854
- [80] PÉREZ D, GASULLA I, CRUDGINGTON L, et al. Multipurpose Silicon Photonics Signal Processor Core[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 636. DOI:10.1038/s41467-017-00714-1
- [81] CLEMENTS W R, HUMPHREYS P C, METCALF B J, et al. Optimal Design for Universal Multiport Interferometers[J]. Optica, 2016, 3(12): 1460-1465. DOI:10.1364/optica.3.001460
- [82] CAO X P, ZHENG S, LONG Y, et al. Mesh-Structure-Enabled Programmable Multi-Task Photonic Signal Processor on a Silicon Chip[J]. ACS Photonics, 2020, Just Accepted Manuscript. DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b01230
- [83] PÉREZ D, GASULLA I, CAPMANY J. Field-Programmable Photonic Arrays[J]. Optics Express, 2018, 26(21): 27265-27278. DOI:10.1364/oe.26.027265
- [84] SHEN B, WANG P, POLSON R, et al. An Integrated-Nanophotonics Polarization Beam-splitter with  $2.4 \times 2.4 \mu\text{m}^2$  Footprint[J]. Nature Photonics, 2015, 9(6): 378-382. DOI:10.1038/nphoton.2015.80
- [85] CHANG W J, LU L, REN X S, et al. Ultra-Compact Mode (de) Multiplexer Based on Subwavelength Asymmetric Y-Junction[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8162-8170. DOI:10.1364/oe.26.008162
- [86] MA Y J, ZHANG Y, YANG S Y, et al. Ultralow Loss Single Layer Submicron Silicon Waveguide Crossing for SOI Optical Interconnect[J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29374-29382. DOI:10.1364/oe.21.029374
- [87] TAHERSIMA M H, KOJIMA K, KOIKE-AKINO T, et al. Deep Neural Network Inverse Design of Integrated Photonic Power Splitters[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1368. DOI:10.1038/s41598-018-37952-2
- [88] PEURIFOY J, SHEN Y C, JING L, et al. Nano-Photonic Particle Simulation and Inverse Design Using Artificial Neural Networks[J]. Science Advances, 2018, 4(6): eaar4206. DOI:10.1126/sciadv.aar4206
- [89] GAO L, LI X Z, LIU D J, et al. A Bidirectional Deep Neural Network for Accurate Silicon Color Design[J]. Advanced Materials, 2019, 31(51): 1905467. DOI:10.1002/adma.201905467
- [90] LIU D J, TAN Y X, KHORAM E, et al. Training Deep Neural Networks for the Inverse Design of Nanophotonic Structures[J]. ACS Photonics, 2018, 5(4): 1365-1369. DOI:10.1021/acsp Photonics.7b01377
- [91] MA W, CHENG F, LIU Y M. Deep-Learning-Enabled On-Demand Design of Chiral Metamaterials[J]. ACS Nano, 2018, 12(6): 6326-6334. DOI:10.1021/acsnano.8b03569
- [92] ASANO T, NODA S. Iterative Optimization of Photonic Crystal Nanocavity Designs by Using Deep Neural Networks[J]. Nanophotonics, 2019, 8(12): 2243-2256. DOI:10.1515/nanoph-2019-0308
- [93] SHEN Y, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep Learning with Coherent Nanophotonic Circuits[J]. Nature Photonics, 2017, 11(7): 441. DOI:10.1038/nphoton.2017.93
- [94] ANNONI A, GUGLIELMI E, CARMINATI M, et al. Unscrambling Light—Automatically Undoing Strong Mixing between Modes[J]. Light: Science & Applications, 2017, 6(12): e17110. DOI:10.1038/lsa.2017.110
- [95] CHENG Z G, RÍOS C, PERNICE W H P, et al. On-Chip Photonic Synapse[J]. Science Advances, 2017, 3(9): e1700160. DOI:10.1126/sciadv.1700160
- [96] FELDMANN J, YOUNGBLOOD N, WRIGHT C D, et al. All-Optical Spiking Neurosynaptic Networks with Self-Learning Capabilities[J]. Nature, 2019, 569(7755): 208-214. DOI:10.1038/s41586-019-1157-8
- [97] LIN X, RIVENSOM Y, YARDIMCI N T, et al. All-Optical Machine Learning Using Diffractive Deep Neural Networks[J]. Science, 2018, 361(6406): 1004-1008. DOI:10.1126/science.aat8084
- [98] YAN T, WU J M, ZHOU T K, et al. Fourier-Space Diffractive Deep Neural Network[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(2): 023901. DOI:10.1103/physrevlett.123.023901
- [99] TAIT A N, DE LIMA T F, ZHOU E, et al. Neuromorphic Photonic Networks Using Silicon Photonic Weight Banks[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 7430. DOI:10.1038/s41598-017-07754-z

## 作者简介



**王健**, 华中科技大学教授、博导, 武汉光电国家研究中心光电子器件与集成研究部主任; 主要从事高速大容量光通信和光信号处理核心器件和关键技术应用基础研究, 包括光电子器件与集成、硅基光子学、光场调控、涡旋光、矢量光、结构光等; 主持国家重点研发计划项目、“973”计划课题、国家自然科学基金等 10 余个项目; 以第一完成人于 2015 和 2019 年两次获得教育部自然科学奖一等奖, 入选国家优秀青年科学基金、长江学者奖励计划青年学者、国家万人计划青年拔尖人才、英国皇家学会牛顿高级学者、教育部新世纪优秀人才、楚天学者特聘教授; 发表 SCI 论文 210 余篇(多篇入选 ESI 高被引和热点论文, 引用 6 200 余次, 《Nature》《Science》及子刊引用 90 余次, 特邀综述 19 篇), 作特邀报告 90 余次, 获授权发明专利 16 项。



**郑爽**, 华中科技大学武汉光电国家研究中心在读博士研究生; 主要从事基于光子集成器件的光场维度调控和关键技术应用基础研究等; 参与国家重点研发计划项目、“973”计划课题、国家自然科学基金等多个项目; 发表 SCI 论文 11 余篇, 发表会议论文 10 余篇。



**曹晓平**, 华中科技大学武汉光电国家研究中心在读博士研究生; 主要从事用于多维光场调控的光子集成器件和关键技术应用基础研究; 作为核心人员参与国家重点研发计划项目、“973”计划课题、国家自然科学基金等多个项目; 目前已发表多篇 SCI 论文。



# 智能化可重构硅光集成器件及芯片应用研究

## Applications of Intelligent Reconfigurable Silicon Photonic Devices and Circuits



谢意维 /XIE Yiwei, 张涛 /ZHANG Tao, 戴道铎 /DAI Daoxin

(浙江大学, 浙江 杭州 310058)  
(Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**摘要:** 可重构硅光集成器件和芯片是实现智能化光通信系统的关键技术, 其小尺寸、低能耗、低成本、高灵活性等特性为新一代光通信等应用带来了新的发展机遇。总结和讨论了一系列新型热可重构硅光集成器件及芯片, 包括可调谐滤波器、光开关代表性功能器件。这些器件及芯片具有设计便捷、工艺简单、兼容等突出优点, 被广泛应用于光互连、量子光学和微波光子学等。

**关键词:** 硅; 可重构; 热光效应; 光子集成芯片

**Abstract:** Reconfigurable silicon photonic devices and chips are key technologies for intelligent optical communication systems. The small size, low energy consumption, low cost, and high flexibility bring new development opportunities for new-generation optical communication applications. We have reviewed and discussed a series of novel thermally-reconfigurable silicon photonic integrated devices and circuits, including reconfigurable optical filter and optical switches, featuring the advantages of easy design and fabrication, which have been widely applied in optical interconnects, quantum photonics and microwave photonics.

**Keywords:** silicon; reconfigurable; thermal-optic effect; photonic integrated circuit

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200410.1438.011.html>

网络出版日期: 2020-04-10

收稿日期: 2020-02-19

在过去几十年中, 硅光子学以其互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容和超高集成密度等突出优点得到了巨大发展, 在低成本大规模光子集成回路方面具有广阔的应用前景, 从而满足日新月异的高速大带宽信息传输和处理的重大需求<sup>[1-2]</sup>。在信号传输和处理过程中, 智能化需求日益迫

切, 以更为灵活高效地实现带宽及信道资源的优化调配; 因此, 发展可重构光子集成芯片尤为重要。其中, 最具有代表性的可重构器件包括可调谐光滤波器、可调光延时线、光开关等, 这些器件已广泛应用于微波光子学<sup>[1]</sup>、量子光学<sup>[2]</sup>、机器学习<sup>[3]</sup>、光通信<sup>[4]</sup>等领域。

实现可重构光子芯片的关键在于根据需要对光波导有效折射率进行调控。常见的几种工作机制主要包括热光效应、电光效应、声光效应、磁光效应等。鉴于热光器件具有结构设计

简单和制造工艺方便等突出优点, 且硅材料具有强热光效应 ( $1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) 和高热传导能力 (约  $149 \text{ W/mK}$ )<sup>[5]</sup>, 热光效应是可重构硅光子器件最常用的物理机制之一。近 10 年来, 热可重构硅光器件及芯片以其低损耗、高消光比、紧凑封装和低功耗等特点得到广泛发展<sup>[6]</sup>。

作为最具代表性的可重构光子器件之一, 可重构光滤波器在许多光学系统中发挥着重要作用。特别地, 利用可重构光滤波器可灵活地选择任意波长信道, 这对于波分复用 (WDM)

**基金项目:** 国家重点基础研究发展项目 (2018YFB2200200)、国家杰出青年基金 (61725503)、国家自然科学基金 (91950205、6191101294、11861121002、61905209)、浙江省自然科学基金 (LZ18F050001、LD19F050001)

系统及频谱分析系统尤为重要。当前,已有多种用于实现硅光滤波器的典型结构,如马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[7]</sup>、阵列波导光栅(AWG)<sup>[8]</sup>、微环谐振器(MRR)<sup>[9]</sup>、布拉格光栅滤波器<sup>[10]</sup>等,如图1所示。通过进一步引入合适的微加热器构建移相器则可以实现可调光滤波器。

光开关是另一个最具代表性的可重构光子器件,用于实现可重构光网络/系统中全光信号路切换和开关,其中,MZI和MRR是两种最常用实现光开关的结构<sup>[11-14]</sup>。MZI开关是一种宽带器件,可实现多个通道的开关切换,而MRR光开关是一种波长选择性开关,适合于单通道的选择性开关切换;因此,这两种开关都是WDM系统关键器件。除了WDM系统,人们还针对模分复用(MDM)系统的需求,开展了多模硅光开关及芯片研究。

在过去几年里,大规模可重构硅光集成回路(PICs)研究取得了巨大的进展,广泛应用于很多领域<sup>[15-17]</sup>,如图1所示。人们研制多种硅基热可重构光分插复用(ROADM)芯片,以满足

WDM系统、MDM系统甚以及WDM-MDM混合复用系统的重大需求<sup>[18]</sup>,同时针对微波光子学应用需求,还研制了多种可重构硅基集成电路,实现了片上多功能切换<sup>[1]</sup>。此外,可重构硅光子学已经扩展到量子光子学领域<sup>[19]</sup>,比如,目前已研制出的全重构硅量子集成回路在单个芯片中实现了多个复杂的量子任务。

本文将对可重构硅光子学及其应用的最新进展进行总结和讨论,主要包括可调谐光滤波器、光开关及其可重构硅光集成回路等方面。

## 1 可重构硅光集成器件

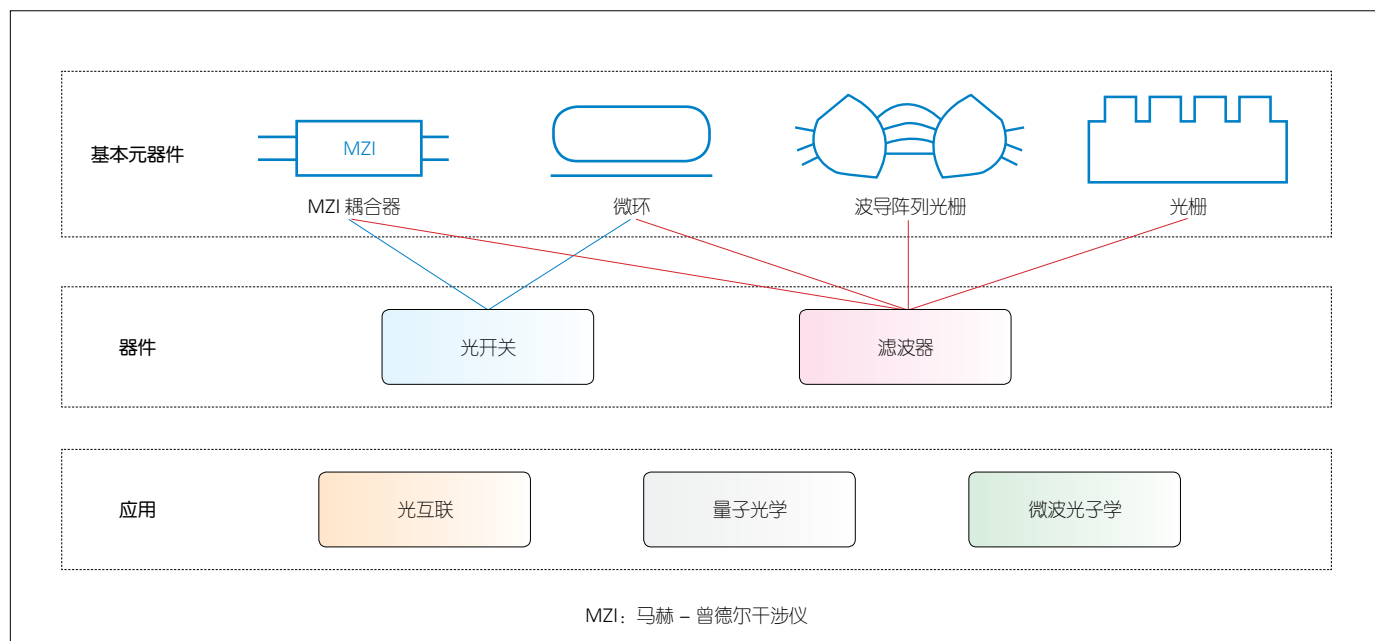
由于硅材料具有显著的热光效应和优异的热传导特性,人们发展了一系列热调可重构硅光集成器件,其中最具代表性的有可调谐滤波器和光开关两种类型的器件。

### 1.1 可调谐硅光滤波器

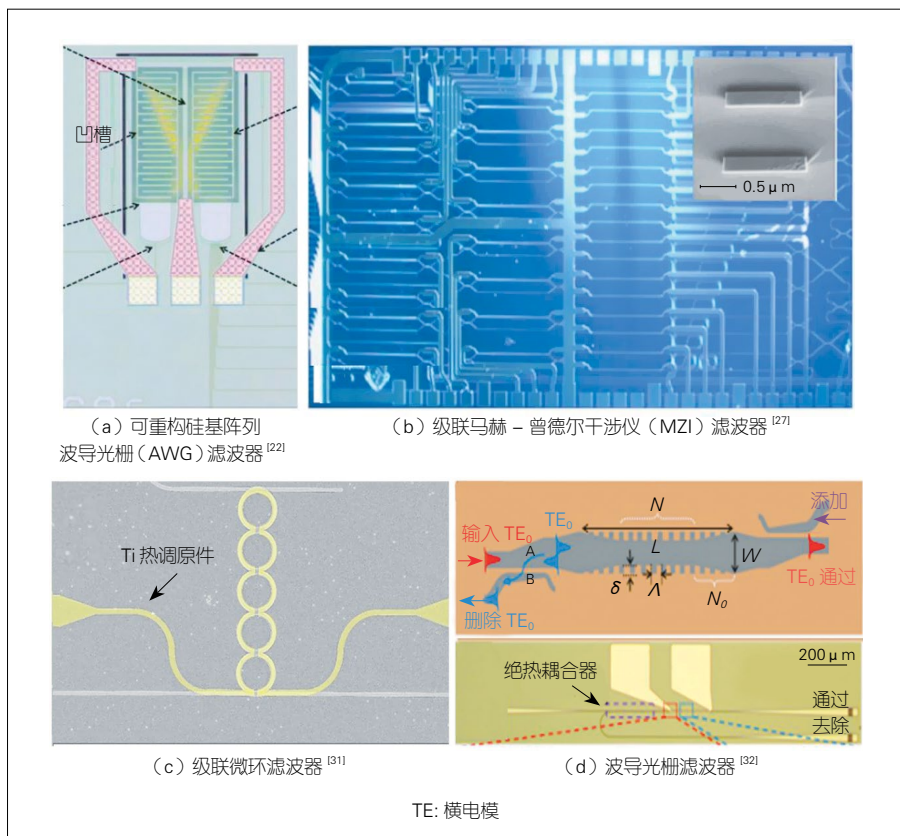
作为一种关键器件,可调谐光滤波器在WDM系统中发挥着非常重要的作用。WDM系统根据信道间距可分

为两类,即粗波分复用(CWDM)和密集波分复用(DWDM)。CWDM具有通道数少、通道间隔大(如 $\Delta\lambda_{ch}=20\text{ nm}$ )的特点,对器件温度不敏感性要求较低,广泛应用于O波段数据中心和无源光网络等系统;相比之下,DWDM通道间隔窄(如 $\Delta\lambda_{ch}=0.1$ 、0.2、0.4和0.8 nm)、通道数多(如40、80或160),通常应用在C波段。为满足不同需求,人们已研制了一系列不同结构的光滤波器,主要包括AWG、MZI、MRR和Bragg光栅等类型。

AWG由于其独特的几何结构,能实现信号傅里叶变换,因而在WDM和正交频分复用(OFDM)系统中都得到了广泛的应用,并实现了可调谐。通过AWG各条阵列波导上引入一个调节元件可精细调控AWG频谱响应,如实现Nyquist响应<sup>[20]</sup>、中心波长可调谐滤波<sup>[21]</sup>等。值得注意的是,常规AWG尺寸较大,其功耗通常较高。为此,人们研制了更小尺寸的紧凑型8通道硅AWG<sup>[22]</sup>,如图2(a)所示,并在功耗为1.3 W时实现了600 GHz调谐范围。为进一步减小器件尺寸及功



▲图1 集成芯片基本元器件及其功能和应用



▲图2 不同结构的光滤波器示意图

耗,交叉自由传输区域(FPRs)<sup>[23]</sup>和反射光栅等新型AWG设计<sup>[24]</sup>被广泛采用。

对于MZI而言,单级结构产生正弦型谱响应,而多级结构可实现平顶谱响应,具有制作简单、尺寸小、易调控等优点。此前,人们采用级联MZI结构并在各个MZI上引入热调元件实现了具有平坦响应的 $1 \times 8$  WDM滤波器<sup>[25]</sup>。为了进一步优化滤波器滚降因子,人们进一步将级联MZI和延迟线相结合构建了平顶Nyquist-DWDM滤波器<sup>[26]</sup>。为增加器件灵活性,文献[27]的作者研制了一种具有31个调谐元件的MZI滤波器,其结构图如图2(b)所示。该器件由MZI和时延线组合,且每个MZI都具有一个调谐元件以调控输入信号振幅,各个延迟线都具有一个调谐元件以调控信号相位,热调元件功耗为 $0.23 \pi/W$ ,可重

构实现不同的滤波器响应。

MRR是另一个典型的光滤波器结构,具有结构简单、尺寸小、可扩展性好等优点。对于MRR,可通过调控其耦合系数及相位来实现带宽及谐振波长的调谐。基于常规单微环结构,人们通过加热整个微环结构实现了热调为 $0.8 \text{ mW/GHz}$ 的滤波器<sup>[28]</sup>,而通过在波导上方引入微热元件的方式可实现热调谐效率达 $1.44 \text{ mW/GHz}$ 的滤波器<sup>[29]</sup>。进一步地通过引入悬空结构则可以将其热调谐效率提升至 $4.79 \text{ nm/mW}$ <sup>[30]</sup>。为获得平顶型频谱响应,人们往往采用多级级联结构,如图2(c)所示<sup>[31]</sup>,通过引入微加热电极,可实现其中心波长调谐,其热调谐效率为 $0.1 \sim 0.17 \text{ nm/mW}$ 。

Bragg光栅也是实现光滤波器的常用结构,其特点是可突破自由频谱范围的局限;但传统布拉格光栅滤波

器通常只有输入/反射、直通等两个端口<sup>[10]</sup>,往往需要额外的片外环行器,这使得器件非常复杂,因而其应用受限。最近,人们通过引入光栅辅助的反方向耦合器实现了具有四端口光学滤波器,如图2(d)所示<sup>[32]</sup>。通过级联实现的多通道大带宽滤波器,可用于O波段CWDM系统,为光纤到户(FTTH)系统提供有效的方案。在此结构中,通过进一步引入热调谐单元也可实现可调谐光滤波器<sup>[32]</sup>,其调节效率可达 $0.16 \text{ nm/mW}$ 。

## 1.2 硅光开关

光开关在高灵活性可重构光系统中扮演至关重要的作用,例如,光开关是光交叉连接和光上传/下载系统的核心器件,它使得光网络/系统中全光信号路由和交换成为可能。在各种实际应用中,人们希望能够实现低损耗、宽带宽、高消光比、偏振不敏感的高性能光开关。实现光开关有两种常用基本结构:一种是基于MZI的宽带光开关,另一种是基于MRR的波长选择光开关。

对于MZI光开关,当两个干涉臂之间相位差切换为 $0$ 和 $\pi$ 时,则可切换成交叉状态和直通状态。近年来,人们研制了多种大带宽、高消光比MZI光开关。其中,采用弯曲定向耦合器成功研制的带宽高达 $140 \text{ nm}$ 的新型MZI光开关<sup>[33]</sup>,如图3(a)所示,是目前最大带宽MZI光开关。同时,MZI光开关偏振敏感性问题也受到广泛关注。2018年,人们成功研制一种偏振不敏感MZI光开关,在整个C波段范围内横磁模(TM)和横电模(TE)偏振的消光比达 $20 \text{ dB}$ <sup>[34]</sup>。此外,利用日益成熟的硅光技术,人们基于高性能MZI光开关单元也实现了较大规模 $N \times N$ 光开关阵列及其应用<sup>[35]</sup>。

对于MRR光开关,其原理是:



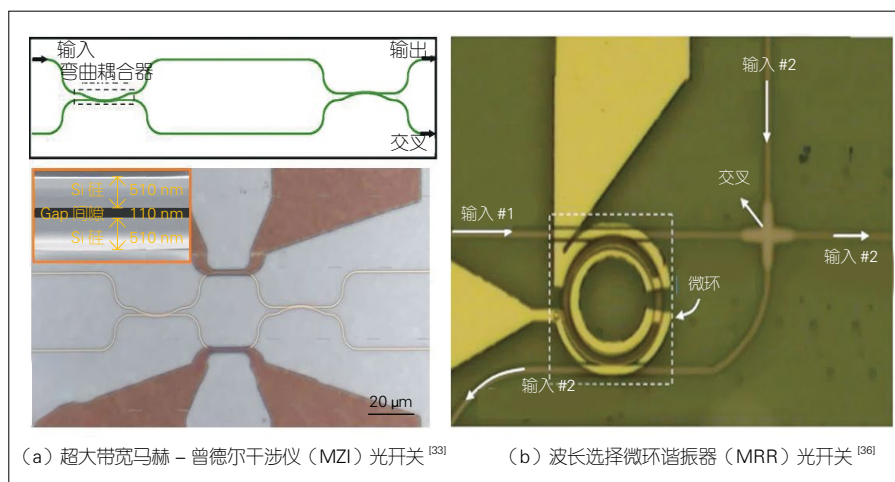
在微环上引入调节元件,通过加热等方式调谐其谐振波长,并利用其波长选择性实现对给定波长通道进行光路切换,如图3(b)所示。进一步地,这种开关可通过级联等方式实现更多波长通道的切换,具有尺寸小、功耗低、结构简单等优点<sup>[36]</sup>;因而特别适合于WDM系统中相应波长信道的上传/下载,具有巨大应用潜力,受到广泛关注。

## 2 可重构硅光集成回路及其应用

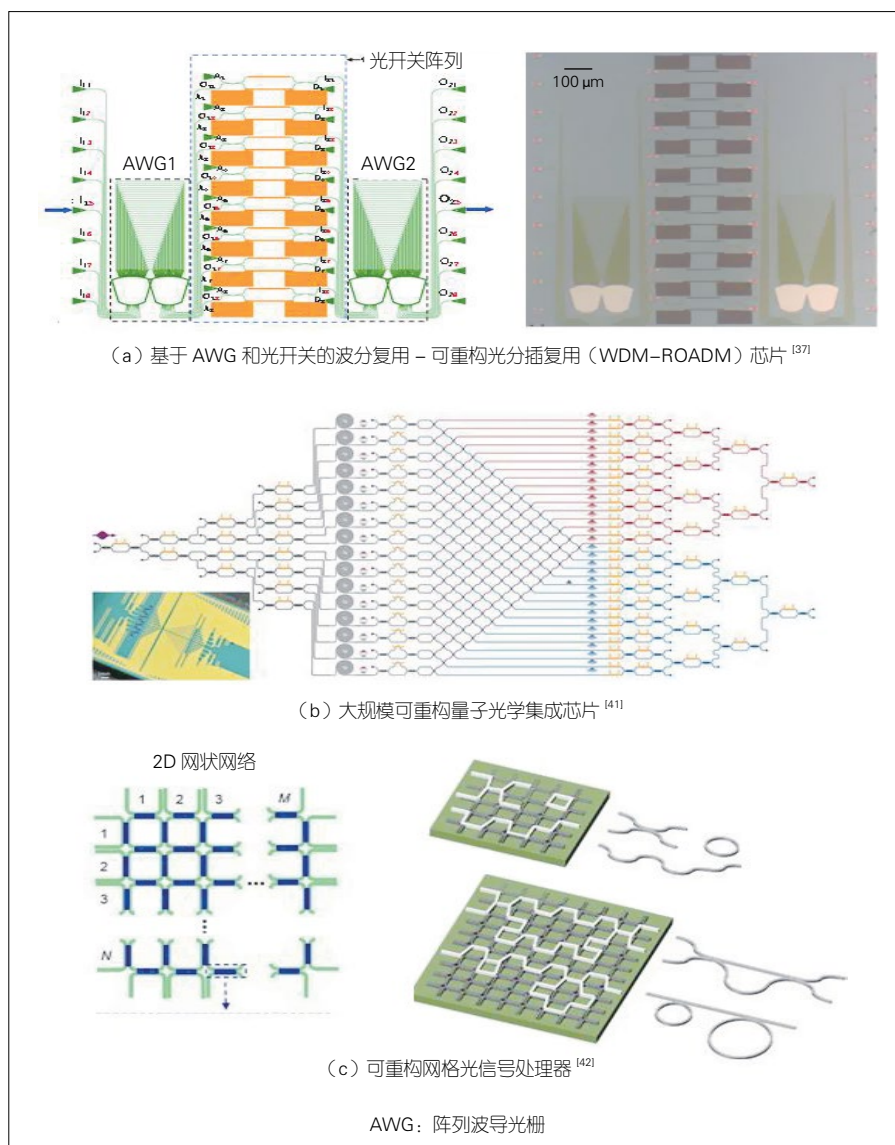
近年来,为提高系统稳定性、降低系统管理复杂度及成本,人们对实现网络节点上全光数据的路由/交换日益迫切,大力发展了各种结构可重构硅光集成回路。

ROADM芯片是其重要代表之一,它通常由多通道复用器/解复用器和光开关阵列组成,近年来取得系列重要进展。2016年,人们针对WDM系统应用需求研制了一个由2个 $8\times 8$  AWG和8个MZI光开关单片集成的ROADM芯片<sup>[37]</sup>,其结构如图4(a)所示,该ROADM芯片可实现任意波长通道的上传和下载。此外,MRR也常被用于ROADM的研制。为了降低MRR谐振波长精确对准的难度,研究者采用多个MRR级联实现平顶滤波效果<sup>[38]</sup>。同时,人们将MZI和多通道模式复用器的单片集成也成功研制了用于MDM系统的ROADM芯片,通过 $2\times 2$ 热光开关可将不同模式通道灵活地上传或下载<sup>[39]</sup>。随着传输容量需求的进一步增长,混合复用技术成为一种新兴技术,为此人们研制了多种面向WDM-MDM混合复用系统的新型ROADM芯片<sup>[40]</sup>。

硅光技术也被逐渐应用到量子光学领域,用于实现片上量子态的产生、操纵和测量等功能,为实现量子信息处理、量子计算和量子通信提供了重要基础。2014年,人们成功研制了可



▲图3 两种常用光开关结构



▲图4 不同结构的可重构硅光集成回路示意图

重构硅基量子光集成芯片<sup>[41]</sup>,通过四波混频实现了片上量子干涉现象。随着技术的发展,2018年人们成功研制了 $15 \times 15$ 可重构偏振纠缠系统,如图4(b)所示,该芯片包含了550个光学元件、100个可编程相移器等。未来可进一步研制实现多个复杂量子任务的全重构硅光量子回路。

此外,可重构硅光集成芯片还被广泛应用于微波光子学,特别是利用其可重构特性,实现多功能切换。2015年,人们提出了一种可编程网格光信号处理器,其结构如图4(c)所示,该器件可实现不同功能的射频(RF)滤波器<sup>[42]</sup>。之后,研究者提出一款电控可编程芯片,可实施一系列的功能,且该芯片集成有源和无源器件,为全集成可编程芯片提供了可行的方案<sup>[43]</sup>。2018年,人们又提出了另一种基于六边形MZI网格光处理芯片,可实现20多种不同功能,比如环形谐振腔、单输入输出有限响应滤波器、耦合谐振腔波导等<sup>[44]</sup>。未来的研究将进一步降低器件损耗和能耗,实现更大规模的可重构硅光集成芯片。

### 3 结束语

本文中,我们讨论了可重构硅光子学及其应用的最新进展,包括可调谐光滤波器、光开关及其可重构硅光集成回路。对于光滤波器,主要有AWGs、MZIs、MRRs和Bragg光栅等器件结构,通过加热相移器均可方便地实现热调谐。对于光开关,MZIs和MRRs是两种最常用的结构。其中,MZI光开关适用于WDM系统中同时切换多个信道的宽带操作,而通过弯曲定向耦合器等方式可获得约140 nm超大带宽。当级联多个MZI光开关以实现大规模 $N \times N$ 光开关阵列时,MZI干涉臂随机相位误差使得测量非常复杂;因此改进结构设计和制造精度以

减小随机相位误差显得尤为重要。而MRR光开关具有波长选择性,通过改变调谐波长来切换任意给定的波长通道。为了获得高消光比并降低对波长控制的敏感度,可将MRR光谱响应设计成方形。未来可考虑开发一种新型MRR光开关,通过引入可调控光衰减而无需波长偏移,由此降低相邻信道串扰。

基于这些可重构光器件及其他无源器件,人们已经研制了多种大规模硅基可重构光子集成芯片并应用于许多领域,包括应用于WDM系统、MDM系统以及WDM-MDM混合系统的硅基ROADM芯片。可重构硅光子集成芯片也被应用于量子光学领域,人们已成功研制可编程硅基量子芯片并实现了片上多个复杂量子任务。此外,可重构硅基光子集成芯片还应用于微波光子学领域,用于实现多功能切换。

总而言之,硅光技术的发展为智能化光通信等更多领域应用打开了大门。为了更好地满足未来需求,需要进一步提升硅光器件设计和制造水平,在超低损耗、超低功耗、超高消光比和超低串扰等高性能硅光器件方面取得突破,从而真正推进大规模硅光集成回路的发展。

### 参考文献

- [1] CAMPANY J, GASULLA I, PEREZ D. Micro-wave Photonics: The Programmable Processor[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 6–8. DOI: 10.1038/nphoton.2015.254
- [2] BONNEAU D, SILVERSTONE J W, THOMPSON M G. Silicon Quantum Photonics[M]// *Topics in Applied Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016: 41–82. DOI: 10.1007/978-3-642-10503-6\_2
- [3] SHEN Y, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep Learning with Coherent Nanophotonic Circuits[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(7): 441. DOI: 10.1038/nphoton.2017.93
- [4] XIE Y W, GENG Z H, KONG D M, et al. Selectable-FSR 10-GHz Granularity WDM Superchannel Filter in a Reconfigurable Photonic Integrated Circuit[J]. *Journal of Light-*

- wave Technology*, 2018, 36(13): 2619–2626. DOI: 10.1109/jlt.2018.2819687
- [5] SONG J F, FANG Q, TAO S H, et al. Fast and Low Power Michelson Interferometer Thermo-Optical Switch on SOI[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 15304–15311. DOI: 10.1364/oe.16.015304
- [6] CHEN S T, SHI Y C, HE S L, et al. Low-Loss and Broadband  $2 \times 2$  Silicon Thermo-Optic Mach-Zehnder Switch with Bent Directional Couplers[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 836. DOI: 10.1364/ol.41.000836
- [7] HORST F, GREEN W M J, 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. DOI: 10.1364/oe.21.011652
- [8] LOWERY A J, XIE Y W, ZHU C. Systems Performance Comparison of Three All-Optical Generation Schemes for Quasi-Nyquist WDM[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21706–21718. DOI: 10.1364/oe.23.021706
- [9] 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): 23784–23789. DOI: 10.1364/oe.18.023784
- [10] NAGHDI B, CHEN L R. Silicon Photonic Contradirectional Couplers Using Subwavelength Grating Waveguides[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 23429–23438. DOI: 10.1364/oe.24.023429
- [11] VLASOV Y, GREEN W M J, XIA F N. High-Throughput Silicon Nanophotonic Wavelength-Insensitive Switch for On-Chip Optical Networks[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(4): 242–246. DOI: 10.1038/nphoton.2008.31
- [12] VAN CAMPENHOUT J, GREEN W M, ASSEFA S, et al. Low-Power,  $2 \times 2$  Silicon Electro-Optic Switch with 110-nm Bandwidth for Broadband Reconfigurable Optical Networks[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24020–24029. DOI: 10.1364/oe.17.024020
- [13] CHEN L, CHEN Y K. Compact, Low-Loss and Low-Power  $8 \times 8$  Broadband Silicon Optical Switch[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18977–18985. DOI: 10.1364/oe.20.018977
- [14] CALO G, D'ORAZIO A, PETRUZZELLI V. Broadband Mach-Zehnder Switch for Photonic Networks on Chip[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(7): 944–952. DOI: 10.1109/jlt.2012.2184739
- [15] Editorial. Birth of the Programmable Optical Chip[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 1. DOI: 10.1038/nphoton.2015.265
- [16] PÉREZ D, GASULLA I, CAMPANY J, et al. Reconfigurable Lattice Mesh Designs for Programmable Photonic Processors[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12093–12106. DOI: 10.1364/OE.24.012093
- [17] CAMPANY J, GASULLA I, PEREZ D. Micro-wave Photonics: The Programmable Processor[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(1): 6–8. DOI: 10.1038/nphoton.2015.254
- [18] GRIECO A, PORTER G, FAINMAN Y. Integrated Space-Division Multiplexer for Application to Data Center Networks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(6): 1–6. DOI: 10.1109/jstqe.2015.2492361
- [19] WANG J W, BONNEAU D, VILLA M, et al. Chip-to-Chip Quantum Photonic Intercon-

- nect by Path-Polarization Interconversion[J]. Optica, 2016, 3(4): 407–413. DOI:10.1364/optica.3.000407
- [20] LOWERY A J, XIE Y W, ZHU C. Systems Performance Comparison of Three All-Optical Generation Schemes for Quasi-Nyquist WDM[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 21706–21718. DOI:10.1364/oe.23.021706
- [21] DIECKROGER J, MARZ R, CLEMENS P C, et al. Thermo-optically Tunable Optical Phased Array in SiO-Si[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(2): 248–250. DOI:10.1109/68.740719
- [22] YANG Y, HU X N, SONG J F, et al. Thermo-Optically Tunable Silicon AWG with above 600 GHz Channel Tunability[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(22): 2351–2354. DOI:10.1109/lpt.2015.2464073
- [23] DAI D X, HE S L. Ultrasmall Overlapped Arrayed-Waveguide Grating Based on Si Nanowire Waveguides for Dense Wavelength Division Demultiplexing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(6): 1301–1305. DOI:10.1109/jstqe.2006.879583
- [24] DAI D X, FU X, SHI Y C, et al. Experimental Demonstration of an Ultracompact Si-Nanowire-Based Reflective Arrayed-Waveguide Grating (de)Multiplexer with Photonic Crystal Reflectors[J]. Optics Letters, 2010, 35(15): 2594–2596. DOI:10.1364/ol.35.002594
- [25] HORST F, GREEN W M J, 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. DOI:10.1364/oe.21.011652
- [26] GOH T, ITOH M, YAMAZAKI H, et al. Optical Nyquist-Filtering Multi/Demultiplexer with PLC for 1-Tb/s Class Super-Channel Transceiver[C]//Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, California. Washington, D.C.: OSA, 2015. DOI:10.1364/ofc.2015.tu3a.5
- [27] XIE Y W, ZHUANG L M, LOWERY A J. Picosecond Optical Pulse Processing Using a Terahertz-Bandwidth Reconfigurable Photonic Integrated Circuit[J]. Nanophotonics, 2018, 7(5): 837–852. DOI:10.1515/nanoph-2017-0113
- [28] NAWROCKA M S, LIU T, WANG X, et al. Tunable Silicon Microring Resonator with Wide Free Spectral Range[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(7): 071110. DOI:10.1063/1.2337162
- [29] 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): 23784–23789. DOI:10.1364/oe.18.023784
- [30] DONG P, QIAN W, LIANG H, et al. Thermally Tunable Silicon Racetrack Resonators with Ultralow Tuning Power[J]. Optics Express, 2010, 18(19): 20298–20304. DOI:10.1364/oe.18.020298
- [31] CHEN P X, CHEN S T, GUAN X W, et al. High-Order Microring Resonators with Bent Couplers for a Box-Like Filter Response[J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6304–6307. DOI:10.1364/ol.39.006304
- [32] LIU D J, WU H, DAI D X. Silicon Multimode Waveguide Grating Filter at 2  $\mu$ m[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2217–2222. DOI:10.1109/jlt.2019.2900439
- [33] LIU D J, ZHANG C, LIANG D, et al. Submicron-Resonator-Based Add-Drop Optical Filter with an Ultra-Large Free Spectral Range[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 416–422. DOI:10.1364/oe.27.000416
- [34] WANG S P, DAI D X. Polarization-Insensitive  $2 \times 2$  Thermo-Optic Mach-Zehnder Switch on Silicon[J]. Optics Letters, 2018, 43(11): 2531–2534. DOI:10.1364/ol.43.002531
- [35] PRITI R B, LIBOIRON-LADOUCEUR O. A Broadband Rearranging Non-Blocking MZI-Based Thermo-Optic O-Band Switch in Silicon-on-Insulator[C]//Advanced Photonics 2017 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, PS), New Orleans, Louisiana. Washington, D.C.: OSA, 2017. DOI:10.1364/ps.2017.pm4d.2
- [36] WANG S P, FENG X L, GAO S M, et al. On-Chip Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer for Hybrid Wavelength/Mode-Division-Multiplexing Systems[J]. Optics Letters, 2017, 42(14): 2802–2805. DOI:10.1364/ol.42.002802
- [37] CHEN S T, SHI Y C, HE S L, et al. Compact Eight-Channel Thermally Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers on Silicon[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17): 1874–1877. DOI:10.1109/lpt.2016.2574459
- [38] XIA F N, ROOKS M, SEKARIC L, et al. Ultra-Compact High Order Ring Resonator Filters Using Submicron Silicon Photonic Wires for On-Chip Optical Interconnects[J]. Optics Express, 2007, 15(19): 11934–11941. DOI:10.1364/oe.15.011934
- [39] WANG S P, WU H, TSANG H K, et al. Monolithically Integrated Reconfigurable Add-Drop Multiplexer for Mode-Division-Multiplexing Systems[J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5298–5301. DOI:10.1364/ol.41.005298
- [40] DAI D X, WANG J, CHEN S T, et al. Monolithically Integrated 64-Channel Silicon Hybrid Demultiplexer Enabling Simultaneous Wavelength- And Mode-Division-Multiplexing[J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(3): 339–344. DOI:10.1002/lpor.201400446
- [41] WANG J W, PAESANI S, DING Y H, et al. Multidimensional Quantum Entanglement With Large-Scale Integrated Optics[J]. Science, 2018, 360(6386): 285–291. DOI:10.1126/science.aar7053
- [42] ZHUANG L M, ROELOFFZEN C G H, HOEK-MAN M, et al. Programmable Photonic Signal Processor Chip for Radiofrequency Applications[J]. Optics, 2015, 2(10): 854–859. DOI:10.1364/optica.2.000854
- [43] LIU W L, LI M, GUZZON R S, et al. A Fully Reconfigurable Photonic Integrated Signal Processor Core[J]. Nature Photonics, 2016, 10(3): 190–195. DOI:10.1038/nphoton.2015.281
- [44] PEREZ D, GASULLA I, CRUDINGTON L, et al. Multipurpose Silicon Photonics Signal Processor Core[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 636. DOI: 10.1038/s41467-017-00714-1

## 作者简介



谢意维，浙江大学讲师；主要研究领域为硅基集成芯片及应用；先后主持和参加国家自然科学基金青年基金等项目；已发表SCI期刊论文20余篇。



张涛，浙江大学在读本科生；主要研究方向为硅基集成芯片；曾获得浙江省创新训练计划优秀奖。



戴道钲，浙江大学求是特聘教授、国家青年科学基金获得者；主要研究领域为硅基纳米光子器件与集成；先后主持国家重点研发计划项目等30余项；在《Nature》《Nature Communications》《Light: Science & Applications》《Proceedings of the IEEE》等期刊已发表SCI论文200余篇，Google Scholar引用9000余次。





# 下一代非易失性 硅基集成光开关探讨

## Next Generation Nonvolatile Silicon Integrated Optical Switch

周林杰 / ZHOU Linjie

(上海交通大学, 上海 200240)

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20200410.1342.007.html>

网络出版日期: 2020-04-13

收稿日期: 2020-02-15

**摘要:** 针对硅波导采用热光或载流子色散效应折射率调节范围小、功耗高且具有易失性的缺点, 提出一种基于相变材料的硅波导调节方法。相变材料具有至少两种稳定状态, 折射率差别巨大, 而且状态的保持不需要外加电压来维持, 具有非易失特性; 因此, 硅与相变材料混合集成可以有效克服硅基光电子本身的物理限制, 能应用于高密度、低功耗、大规模集成光开关芯片中。

**关键词:** 硅基光电子; 相变材料; 混合集成光电子; 光开关

**Abstract:** In view of the shortcomings of using thermo-optic or free-carrier plasma dispersion effect to achieve refractive index modulation of silicon waveguide, such as small tuning range, high power consumption and volatility, a method based on phase change materials is proposed. Phase change materials have at least two stable states. The refractive index has a large change upon phase change, and moreover, maintaining the state does not require an external voltage, exhibiting non-volatile characteristics. Therefore, the hybrid integration of silicon and phase change materials can effectively overcome the physical limitations of current silicon photonic devices, and can be applied to high-density, low-power, large-scale integrated optical switch fabrics.

**Keywords:** silicon photonics; phase change materials; hybrid integrated photonics; optical switch

### 1 大规模硅基光开关技术难点

宽带网络作为中国信息化的重要基础设施, 是承载各种信息化应用的重要载体。美国、韩国、日本、法国、意大利等发达国家都已相继出台宽带发展的新战略。建设宽带光网络是落实中国信息化发展战略、大力推进国民经济建设和社会信息化进程的重要举措; 然而, 现有的光网络因缺乏核心光交换器件, 即高速、大规模光交换芯片, 仍采用电子交换技术。随着传输速率和容量的不断提升, 受“电子瓶颈”的限制, 这种交换方式很难满足中国信息化网络宽带、多业务融合、安全等方面的

需求, 因此迫切需要实现端口数量大、单信道速率高、切换速度快的全光交换芯片。全光交换直接在光域对光信号进行处理, 无须经过光-电-光转换, 因而不受“电子瓶颈”的限制, 具有高速、宽带、透明、低功耗以及潜在的低成本等诸多优点。硅基光电子器件具有尺寸小、集成度高, 制作工艺与传统微电子互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺相兼容的特点, 因此可以大幅度降低光开关芯片成本<sup>[1-2]</sup>; 但基于目前硅基光电子技术的光开关同时也存在不少问题, 主要有以下几个需要攻克的难点:

(1) 扩大光开关阵列的规模。一方面, 硅基  $2 \times 2$  光开关单元可以具

有较高的性能, 但是实际应用要求开关阵列端口数较多, 损耗和串扰也会在端口数增多时更加严重, 这大大限制了光开关芯片规模的进一步拓展; 另一方面, 光开关阵列规模增大意味着芯片尺寸的增大, 这就需要芯片在加工工艺中保持均匀性和低缺陷。因此, 需要创新设计出性能更好的开关单元器件, 优化整体拓扑结构, 提高制作工艺精度和稳定性, 确保大尺寸芯片中各个单元器件性能的一致性。

(2) 降低硅基光开关芯片的损耗和串扰。硅波导相比于二氧化硅波导具有更大的传输损耗, 也没有 III/V 族材料可以对信号进行放大的能力, 因

此随着交换端口数目的增加, 每条光路上经过的单元器件越多, 光路损耗就会随之增大。硅基光开关阵列通常采用微环和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)作为开关单元, 尤其采用载流子色散效应时对光的隔离度较低, 因此串扰较大。硅基光开关芯片的损耗和串扰性能问题会随着端口数目的增加更加凸显, 这也限制了硅基光开关芯片朝更大规模发展。

(3) 降低光开关芯片的驱动功耗。功耗问题是光电子芯片往更高集成度和更大尺寸发展需要解决的一个重要问题。当光开关阵列端口数增加后, 芯片的总功耗会呈几何增长, 这不仅对驱动电路提出了更高的挑战, 而且会使芯片温度急剧升高, 影响光开关的正常工作。低功耗是未来集成光电子发展的必然要求。降低光开关芯片功耗需要从光开关单元器件着手, 同时减小维持状态所需的静态功耗和状态转变中的动态功耗。

(4) 提高集成密度和调节效率。通常情况下, 硅基光电子集成器件通过热光效应或者载流子色散效应来改变硅材料的特性, 从而实现对硅波导的调节。热光效应的响应速度比较慢, 通常在微秒量级, 折射率变化在 0.01 量级。载流子色散效应虽然响应时间快, 但其折射率的调节范围有限, 通常只有 0.001 量级; 因此为了达到  $180^\circ$  相位的变化, 需要几百微米长度, 导致光开关尺度很大、功耗很高。虽然采用高 Q 值谐振腔结构或光子晶体慢光结构可以减小器件尺寸, 但其工作带宽通常很小、损耗较大, 无法大规模级联, 且对环境温度变化非常敏感。

(5) 消除光开关芯片的偏振相关性。目前, 硅波导器件大多采用 220 nm 厚绝缘体上硅(SOI)晶圆制备, 因此光器件大多对偏振比较敏感。硅

基光开关芯片一般只支持横电模(TE)或者横磁模(TM)偏振的光信号, 而实际光通信系统都希望器件能够交换任意偏振的光。通常实现偏振无光主要是将输入光分为不同偏振的两路分别在两个相同的交换阵列上进行交换处理, 交换完后再进行合路输出。这种方法所需芯片面积增加了一倍, 驱动控制也较为复杂; 因此, 未来光开关芯片的发展需要采用更简单、更灵巧的方式来实现偏振无关性。

由此可见, 采用传统的硅基光开关方案(如马赫-曾德尔结构或微环结构)和调节方式(热调或注入载流子电调)在损耗、串扰、功耗、偏振相关性等方面已不能满足实际光通信系统对大规模光开关阵列的需求。特别需要指出的是, 热调和电调都需要消耗很大的功耗来保持某一种开关状态, 且开关状态具有易失性(断电后开关状态无法保持)。这限制了光开关规模的拓展, 降低了它在光通信系统中的实用性。

## 2 利用相变材料突破光开关技术瓶颈

### 2.1 相变材料研究历史

1968 年, 斯坦福大学 S. OVSHINSKY 在研究相变薄膜材料的时候发现了一个规律, 即这种材料有一种从无序到有序变化的特点, 相变材料也就是从这里进入到人们的视野中。两年后, S. OVSHINSKY 与 Intel 的 Moore 进行商业合作, 并创办了自己的公司。也就是在那年, 第一个 256 位的相变存储器诞生。

70 年代以后, 半导体制备工艺的飞速提升让相变材料也得到了蓬勃发展。后来, 硫系化合物被广泛使用到了相变材料中, 此类化合物主要集中在元素周期表的 VI 族。硫系相变材

料 GexSbyTez (GST) 作为最出名的相变材料, 已经广泛在可擦写的光盘中使用, 并且 GST 在常温下有着晶态和非晶态两种稳定的形态。这两种形态在一定的条件下能够互相地转变, 光盘也就是利用这两种状态的有效折射率的不同来存储二进制的信息。其实 GST 作为可擦写光盘的相变存储材料早就实现了商用, 所以对于如何制备该材料, 以及如何来回控制状态的改变都进行了深入的研究。在光学的应用过程中, GST 的折射率、吸收率等一系列光学参数也通过理论计算以及大量的实验测试得到了较为准确的数值, 这为以后将 GST 与已有的硅光平台相结合来进行集成光子器件的设计提供了重要的数据参考。

### 2.2 相变材料分类

根据材料是否具有挥发性, 一般将相变材料分为两种: (1) 挥发性的相变材料, 也就是半导体氧化物或者过渡金属氧化物, 代表物为二氧化钒( $\text{VO}_2$ ); (2) 非易失性的相变材料, 也就是一系列的硫系化合物, 代表性材料为锗锑碲合金(GexSbyTez)。

$\text{VO}_2$  作为经典的挥发性相变材料, 具有金属相和绝缘体相两种形态。当其位于  $68^\circ\text{C}$  附近会发生金属相和绝缘体的相互转变。当温度低于  $68^\circ\text{C}$  的时候,  $\text{VO}_2$  处于绝缘体相(单斜晶相), 电阻率很大, 呈现半导体甚至绝缘体的性能, 对通信波段的光源具有非常强的透射率。而当温度加热超过  $68^\circ\text{C}$  以上时,  $\text{VO}_2$  处于高温下的四方红金石相。它的电导率会发生大幅度的提高, 从而发生相变, 具有与金属相类似的各种电学与光学性质, 对通信波段的光的吸收率得到极大提升。在整个相变过程中,  $\text{VO}_2$  并不需要任何其他的操作, 只需要等待材料逐渐地冷却就可以使其转变到刚开始的绝缘

体形态；但是，由于该材料的状态随着温度会发生不断的改变，因此我们得时时控制  $\text{VO}_2$  周围的温度来确保该状态的稳定，这也就产生了一定的静态功耗。因为相变的温度是  $68^\circ\text{C}$ ，所以来回相变只需要在室温中操作即可，从而大大地减小了相变的功耗和操作难度。另一方面这个特性也限制了  $\text{VO}_2$  在温度较高的恶劣环境中使用。在制作工艺上， $\text{VO}_2$  的制备比较困难，尤其是它的其他氧化物。目前能够制备高质量  $\text{VO}_2$  薄膜的工艺为激光脉冲沉积和外延生长法。

第二类相变材料是硫族化合物，也就是含有元素周期表 VI 族元素的化合物或者合金等材料。硫系相变材料通常只有碲 (Te) 和硒 (Se) 元素，极少数的硫系相变材料含有硫 (S) 原子。这种非挥发性相变材料和  $\text{VO}_2$  有着很大的不同。硫系化合物是晶体状态和非晶态状态的相互改变，而不是  $\text{VO}_2$  那样的绝缘体态和金属态的相互转变，这也就意味着这类材料具有非易失性。也就是当它从一个状态转变到另一个状态后，它将会自动的保持现在的状态而不需要任何能量的输入，直到需要改变成下一个状态；因此，这类材料被广泛使用在信息存储中。硫系相变材料在相变存储介质的巨大优越性受到了学术界以及工业界的持续关注，得到了快速的发展。目前有很多成功的成分都已经商业化，其中最具有代表的材料是  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 。这类相变材料制作工艺简单，利用溅射或蒸发等方法都可以在其他材料上沉积薄膜，而且这类材料可以按照需求添加一些其他组分来形成新的材料，比如  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 。

### 2.3 硅和相变材料混合集成

采用相变材料和硅相结合，可以突破目前硅基光电子平面集成光开关在尺寸、功耗、易失性等方面的问题。

相变薄膜材料作为存储介质实现数据存储，除具有读写速度快（纳秒量级）、循环次数高 ( $>10^{12}$ )、功耗低等特点之外，还与现有的 CMOS 工艺兼容，技术实现难度和产业成本较低。相变材料在晶态和非晶态时折射率差别巨大，可以通过热、光、电等多种方式诱导进行相变，且具有稳定的特性。

相比于其他相变材料，GST 系列合金是最为成熟的相变材料，具有晶化速率快、非晶态与晶态电阻和折射率变化大、非晶态和晶态之间具有较好的可逆性等优点。GST 材料的晶化温度约为  $168^\circ\text{C}$ ，结晶时间可以达到纳秒量级，适合于光开关应用。在  $168^\circ\text{C}$  附近，GST 薄膜发生从非晶态到面心立方 (FCC) 晶态结构的转变，薄膜方块电阻缓慢下降。而在  $300^\circ\text{C}$  附近，GST 薄膜发生从 FCC 结构到六方结构 (HEX) 转变，电阻进一步下降。最后当温度高于  $350^\circ\text{C}$  后，电阻基本保持不变。由于非晶态 GST 薄膜表现为半导体特性，FCC 晶态薄膜表现为半金属特性，而六方晶态薄膜表现为金属特性，三者的电阻率发生了巨大改变，也导致了光学特性，即材料折射率 (包括实部和虚部) 发生巨大跳变。

采用 GST 相变材料的相变特性来调节波导的折射率，使硅波导具有常规热光效应和载流子色散效应所无法达到的折射率调节幅度<sup>[3-5]</sup>。由于 GST 的非晶态和晶态都具有特定的光学特性，因而实现的光开关两种状态具有自保持能力。这种调节方式既是数字式的，也具有非易失性，从而能确保大规模光交换芯片的稳定工作，方便构建大容量交换系统。光开关无静态功耗，只有 GST 相变时的动态功耗，因而相比于传统采用热光效应或载流子色散效应实现的光开关，具有更小的功耗，特别是当光开关状态需要保持较长时间（切换不频繁）时，功耗

上的优势更加明显。

## 3 硅基相变光开关实现需考虑的问题

(1) GST 材料的相变机理及其对光路的调控。GST 相变材料是由 GeTe 和  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  通过不同配比得到，结合了 GeTe 具有较快非晶化速度和  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  具有较快晶化速度的优点。不同的配比具有不同的性质，需要优化配置获得最佳光学调控特性。GST 晶体具有亚稳相立方结构和稳定相六方结构，但非晶相的结构中原子之间是随机共价键网络，只具有近程有序性。GST 能实现快速相变的机理是因为非晶相和晶相具有一定的相似性，只需要打断 Ge-Te 键，让 Ge 原子在八面体结构和四面体结构之间跳跃（伞型跳跃），就可实现在不同晶体结构间的转变。这种结构转变过程中原子的移动很小，非晶化和晶化速度快，从而实现材料在高折射率和低折射率状态的快速切换，对应于开关的“0”与“1”。实现开关的快速切换需要深入了解高速电场作用下伞型跳跃的工作机制，尤其是 Ge-Te 键的如何快速形成和断开，从而实现对光路的快速调控。GST 晶体具有亚稳相立方结构和稳定相六方结构，但其非晶结构很难确定，因为在非晶时原子排列是无规则的。文献报道中已用各种实验方法和理论计算得到很多不同的结果，但到目前为止仍没有一个统一的结论，还需要进一步探索。此外，对 GST 薄膜进行掺杂也会对其结构、热学、电学、光学等材料性能带来重要影响，需要探索不同掺杂元素在 GST 薄膜中存在的形式及具体作用，分析掺杂 GST 薄膜的结晶特性及相变特征。GST 材料的光学特性及其在对光路调控方面的应用，与它在微电子相变存储器中的应用不同，这是将 GST 材料用于制作光开关芯片的基础。

(2) 基于硅和相变材料混合集成



光波导的开关单元结构。在硅波导中引入 GST 材料形成的新型复合光波导结构,具有新颖的模场特性,其传播常数和吸收损耗等特征均不同于单质材料波导,需要分析这种光波导的模式耦合、传输、控制等问题,以此确定开关单元设计中所需要的复合波导结构和关键参数。复合波导与常规硅波导间需要进行模式转换,充分利用复合波导的开关调控和无源硅波导的传输功能。基于 GST 相变材料构建光开关,需要采用外加电流脉冲或电场诱导实现非晶态与晶态间的相变;因此,在调控部分需设计电阻微加热器或类似金属氧化物(MOS)电容电极结构。外加电压在 GST 层内产生瞬时强电流或强电场,对 GST 材料产生作用,实现高速相变。新型相变材料的引入,不能采用传统的电路模型来分析和设计,需要研究如何与复合波导结合,实现对波导模式的高效调节,从而设计出微米量级超小型光开关单元器件。

(3) 大规模无阻塞光开关阵列设计。大端口数的开关阵列是由若干个  $1 \times 2$  或者  $2 \times 2$  光开关单元通过一定的拓扑结构连接实现。阵列的拓扑结构会影响到光开关芯片的诸多性能,如阻塞性、损耗、串扰、功耗等。通过掌握不同拓扑结构的光开关特点,比较它们各自优缺点,根据相变开关单元的特性(平行和交叉状态下的损耗、串扰等)来设计大规模阵列的拓扑结构。选择光开关阵列的拓扑结构,也要考虑如何通过运用整体结构的特点来消除光开关芯片的偏振敏感性。对于大规模阵列,实现优化控制需要监控每个单元的工作状态,需要开发波导光功率监控技术。这种光功率监控应该具有非侵入性,即不会对所监控的光路产生影响。由于大规模开关阵列中包含的开关单元数目巨大,采用常规的引线键合无法实现电极与外

部电路的连接,需要采用高密度倒扣焊的方式,实现对每个单元的电学控制。采用常规一维光纤阵列无法进行多端口的输入和输出耦合,需要新型的二维光纤阵列或二维多芯光纤与芯片的高效耦合。

(4) 大规模光开关阵列芯片制备和测试方法。高质量 GST 薄膜沉积是相变光开关制作中的关键工艺。目前 GST 薄膜制备方法有蒸发法、溅射法、激光脉冲沉积法、化学气相沉积法等。不同的制备方法和工艺条件对所形成的 GST 薄膜纯度、稳定性、相变效率等参数有不同影响,可通过多种材料特性表征方法来获得薄膜物理和化学信息。由于不同成分配比的 GST 性能差异较大,不同元素的掺杂会影响相变特性,如何简单、经济地制备具有稳定可重复相变特性的 GST 薄膜依然是一个巨大的挑战。该 GST 薄膜还需要和硅波导相结合,在制备硅波导和电极过程中,需要保证 GST 的材料属性不发生退变。另外,超小型光开关制作还需要高精度的光刻/套刻、干法刻蚀、离子注入、快速热退火等硅基加工工艺,不同工艺对微纳尺度器件的形貌、掺杂分布等产生影响。在完成器件制备后,对光开关的工作速度、带宽、功耗等性能技术指标进行全面测试和细致分析。根据实验数据和理论模型提取重要指标参数,分析影响一致性的主要因素,提出模型改进的方法,完善光开关设计和制备技术;因此,需要设计有效的整套工艺制备流程,提高制作工艺中光刻和刻蚀的精度和稳定性,保证大尺寸芯片中各个单元器件性能的均衡性,提高器件性能和成品率,从而实现大规模集成相变光开关芯片。

## 4 结束语

大容量光交换芯片是 Pbit/s 信息

时代急需突破的难点问题之一。对光电子而言,多端口光交换芯片属超大规模集成,受折射率调节方式以及器件尺寸、速度、功耗等的限制,采用现有的硅基光开关技术实现仍具有较大挑战。另外,多端口光交换芯片的控制非常复杂,实用化要求光开关采用数字化控制,且必须是非易失的。采用先进相变材料与硅构成混合集成波导,突破现有光开关结构与性能限制,设计并实现多端口高速、低功耗非易失光交换芯片具有重要意义,可以为下一代光通信和光互连中的全光信息交换提供技术支撑。

## 参考文献

- [1] LU L J, ZHAO S Y, ZHOU L J, et al.  $16 \times 16$  Non-Blocking Silicon Optical Switch Based on Electro-Optic Mach-Zehnder Interferometers[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9295-9307. DOI: 10.1364/OE.24.009295
- [2] GUO Z Z, LU L J, ZHOU L J, et al.  $16 \times 16$  Silicon Optical Switch Based on Dual-Ring Assisted Mach-Zehnder Interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 225-232. DOI: 10.1109/JLT.2017.2751562
- [3] ZHANG H Y, ZHOU L J, XU J, et al. Nonvolatile Waveguide Transmission Tuning with Electrically-Driven Ultra-Small GST Phase-Change Material[J]. Science Bulletin, 2019, 64(11): 782-789. DOI: 10.1016/j.scib.2019.04.035
- [4] ZHANG H Y, ZHOU L J, LU L J, et al. Miniature Multilevel Optical Memristive Switch Using Phase Change Material[J]. ACS Photonics, 2019, 6(9): 2205-2212. DOI: 10.1021/acsphotonics.9b00819
- [5] HU H, ZHANG H Y, ZHOU L J, et al. Contra-Directional Switching Enabled by Si-GST Grating[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1574-1584. DOI: 10.1364/oe.381502

## 作者简介



周林杰, 上海交通大学教授、区域光纤通信与新型光通信系统国家重点实验室博士生导师; 研究方向为集成光电子器件和芯片; 作为负责人主持和参与了“863”、自然科学基金等各类科研项目 30 余项; 2016 年获牛顿高级学者基金, 2015 年入选首届青年长江学者, 2014 年获得自然科学基金优秀青年基金并入选上海市青年科技启明星计划; 在国际知名期刊上共发表学术论文 250 余篇(其中 SCI 论文 100 余篇), 在 OFC、CLEO、OECC、ACP 等国际会议上作特邀报告 50 余次。



# 5G 场景化网规方案探讨

## 5G Scenario Network Planning Scheme

邹广玲 / ZOU Guangling

潘彩华 / PAN Caihua

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202002011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200410.1324.005.html>

网络出版日期: 2020-04-10

收稿日期: 2020-02-16

**摘要:** 随着 5G 技术的发展和用户业务需求的提高, 5G 应用场景日趋多样化, 5G 建网面临巨大的挑战和机遇。大规模多输入多输出 (MIMO) 关键技术的引入, 增加了场景和参数规划的复杂性。5G 无线网络规划需要充分考虑场景化特点, 提供多样化、差异性的解决方案, 增强 5G 网络的市场竞争力。针对当前问题, 提出了一个宏站、深度覆盖、室分等多个场景的综合规划方案, 以提升网络整体性能。探讨了在大规模 MIMO 技术下, 基于大数据进行精准天线广播权值参数规划的意义和方法, 以提高 5G 网络规划的准确度。

**关键词:** 大规模 MIMO; 天线权值; 网络规划; 场景

**Abstract:** With the development of 5G technologies and the improvement of users' service requirements, 5G application scenarios are becoming more and more diversified, and 5G network construction is facing great challenges and opportunities. In addition, the introduction of key massive multiple-input multiple-output (MIMO) technology increases the complexity of scenario and parameter planning. 5G wireless network planning needs to fully consider scenario-based characteristics, provide diversified and differentiated solutions, and enhance the market competitiveness of 5G networks. In response to the current problems, we propose an integrated planning scheme for macro station, deep coverage and indoor distribution to improve the overall network performance. Furthermore, in order to improve the accuracy of 5G network planning, the significance and methods of precise antenna broadcast weight parameter planning based on big data under the massive MIMO technology are discussed.

**Keywords:** massive MIMO; antenna pattern; network planning; scenario

## 1 概述

### 1.1 5G 网规方案关注点

5G 网络已经开始进入规模建设阶段<sup>[1-4]</sup>。为了更好地体现 5G 性能, 需要从场景角度, 如宏覆盖、密集住宅区、场馆、校园、地铁、高铁等场景<sup>[5]</sup>给出精准专业的规划建设方案。

基于大规模天线阵列的大规模多输入多输出 (MIMO) 是 5G 空口核心技术, 该技术带来的空口革新极大地提升了 5G 网络覆盖和性能。这主要表现在: 通过广播窄波束扫描、多样化天线权值组合及用户级动态窄波束精准覆盖提升覆盖能力; 同时通过

基于波束赋形的多用户 (MU) -MIMO 技术, 提升网络频谱效率。传统的网规方法无法满足基于大规模 MIMO 的网络覆盖、速率和容量规划需求。5G 网规需要解决的核心问题是如何基于大规模 MIMO 技术进行场景化精准网络规划建设。

### 1.2 5G 大规模 MIMO 特性分析

5G 引入了广播波束扫描的概念。小区广播信息通过同步/广播块 (SSB) 发送, 包含主同步信号 (PSS)、辅同步信号 (SSS) 和物理广播信道 (PBCH)。SSB 在多个不同指向的子波束上依次发射, 其个数与具体定义的帧结构密切

相关。2.6 GHz 频段、5 ms 单周期结构最多有 8 个 SSB 可选位置, 最大可以支持 8 个子波束; 3.5 GHz 频段、2.5 ms 双周期结构最多有 7 个 SSB 可选位置, 最大可支持 7 个子波束。经过 5G 建网研究, 目前主流网络采用 7/8 波束组网<sup>[6]</sup>。

SSB 每个子波束, 通过配置不同的天线端口权值, 来确定各自的波束宽度和指向。5G 小区支持灵活的广播波束权值配置, 生成不同组合的 SSB 赋型波束, 以满足不同场景覆盖要求。5G 天线与 4G 天线的不同之处在于 3D 波束赋形, 即相较于 2D 波束赋形, 在垂直维度增加了一个可利用的维度<sup>[7]</sup>。

5G 新的天线特性带来的垂直面覆盖和性能变化,需要在无线网络规划中进行相应的规划和研究。

## 2 5G 场景化网规方案

5G 建网首先需要根据建筑物、覆盖、话务、信息点 (POI) 等信息建立场景特征库,精准区分场景,然后根据场景特征匹配 64 收发通道 (TR)、32TR、8TR、4TR、2TR 以及 Pico 等产品。宏站产品最终通过天线权值规划给出小区级别规划方案,并需要综合场景、设备能力、成本给出解决方案<sup>[8]</sup>,如图 1 所示。

### 2.1 5G 场景划分

5G 精准规划需要进行场景识别。首先利用在线地图的 POI 识别可以得到建筑物的居民区、办公楼等属性,然后结合高精度电子地图提取建筑物信息,最后根据覆盖、话务信息综合确定场景类别。

借助大数据平台,结合上述几个维度综合得到的小区级别、栅格级别和建筑物级别的价值信息,区分出需要宏覆盖场景、室分覆盖场景以及深度覆盖场景。场景与产品匹配得到场景化方案。

### 2.2 场景化规划方案

室外宏覆盖场景需要结合实际需求选择宏覆盖设备进行覆盖,以保证室外用户感知。深度覆盖场景可以引入微站,改善核心价值区的覆盖和容量性能。高价值室内及竞争对标区域引入新型室分,提升用户体验。部分现网 4G 部署室内分布系统的场景,在容量需求满足的情况下,可考虑利用旧室内分布系统进行快速低成本部署。

#### 2.2.1 宏站规划方案

##### 2.2.1.1 不同宏站能力对比分析

64TR 设备和 32TR 设备是室外最

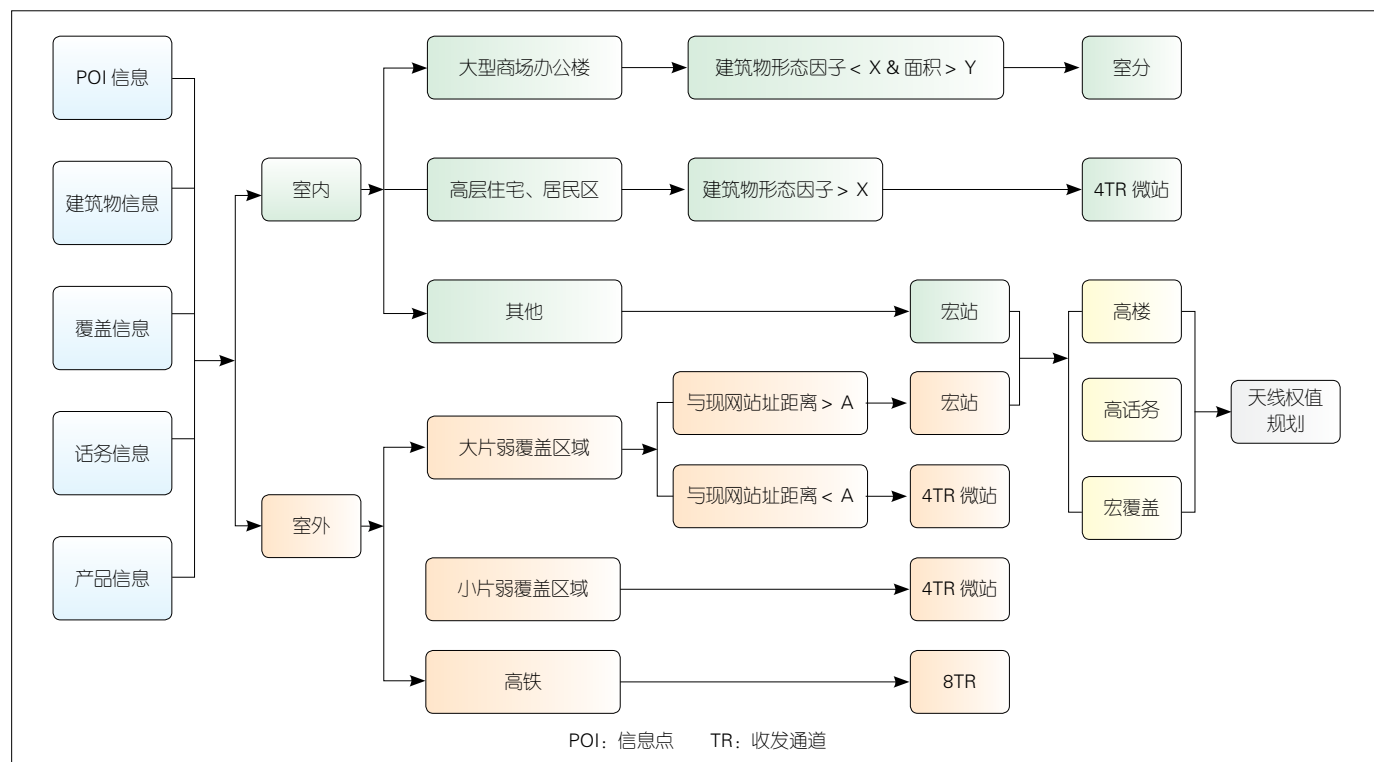
主要的产品,在实际建网中如何选择至关重要,这需要综合覆盖、容量和无线环境等几个维度进行评估。

(1) 水平覆盖对比。64TR 可提升上行覆盖,使边缘速率提升 1.5 倍;下行赋型更精准,下行边缘速率可提升 2 倍。

(2) 容量对比。多流自适应场景下,相对于 32TR,64TR 在静止环境、全缓冲业务下提供 16% 左右的流量增益,在移动环境下提供 36% 左右的流量增益。

综合以上分析,由于空间分辨率的提高,相比于 32TR,64TR 在静止和移动环境下均能提供显著的吞吐量增益。

(3) 垂直覆盖维度。相对于 32TR,针对楼宇覆盖,64TR 在低、中、高层均有明显的性能增益,约为 6% ~ 43%;针对地面覆盖,64TR 有 4% ~ 15% 的性能增益。同时,由于更大的垂直天线 3 dB 扩展角、更灵活



▲图 1 5G 场景化方案匹配



的业务赋形能力, 64TR 为整个垂直维度(尤其是中高层覆盖)都带来明显的性能增益。

垂直覆盖维度对比结果表明: 64TR 更适合楼宇覆盖。我们建议 64TR 应用于 10 层以上的中高楼宇覆盖, 32TR 应用于中低层楼宇覆盖, 测试结果如图 2 所示。

(4) 从无线环境角度考虑。在密集城区和一般城区, 无线环境复杂, MU-MIMO 配对成功率高, 64TR 性能更优; 在郊区和农村, 无线环境相对简单, MU-MIMO 配对成功率降低, 32TR 足够满足性能需求。

需要精确进行大规模 MIMO 站点规划时, 建议在用户/业务高热区域使用 64TR; 非高话务区域可选择性使用 32TR, 以降低建网成本。

### 2.2.1.2 场景化站点选择建议

从场景特点来看, 密集城区和一般城区站间距在 200 ~ 500 m, 话务密度大, 80% 用户发生在建筑物室内; 郊区、农村等场景话务量相对低, 50% 用户发生在室内<sup>[9]</sup>。结合不同场景环境和话务特征, 根据 64TR、32TR 和 8TR 等常见设备机型的覆盖、容量以及工程情况差异, 场景化站点选择建议如下:

(1) 覆盖维度。当超过 20% 的覆盖区域高度大于 10 层建筑物为中高楼宇场景时, 建议 64TR 应用于 10 层以上的中高楼宇覆盖, 32TR 应用于 8 层以下中低层楼宇覆盖。

(2) 容量维度。热点场景判别, 根据 4G 现网热点选择。建议在用户/业务高热区域使用 64TR; 非高话务区域可选择性使用 32TR, 以降低建网成本。

(3) 城区、高热场景可主要采用 64TR 设备; 郊区、农村等场景可以主要采用 32TR 设备。

(4) 站型选择要尽量连片成簇, 避免完全小区级别插花, 可以通过 64TR+32TR 混合组网(64TR 为主, 32TR 为辅), 实现高低搭配, 以兼顾容量和成本。局部天面受限场景、高铁等场景, 可以考虑采用 8TR 设备。

### 2.2.2 深度覆盖规划方案

对于高热和补盲场景, 需要结合微站等产品增强覆盖和容量, 给出网络规划建议。微站产品体积小, 安装灵活, 可以与宏站、室分一起宏微组网, 以满足现网需求提升网络性能。

(1) 栅格级分析。地理化栅格级覆盖数据以及话务数据通过聚类分析后, 得到现网存在弱覆盖区域和高热区域。

(2) 站址部署方案。考虑场景信息、话务量、弱覆盖面积、与现网站址距离等因素, 通过决策树算法, 匹配场景和设备, 给出最优站址部署方案。

### 2.2.3 室分规划方案

4G 现有室分建议全部利旧, 以充分满足 5G 用户业务需求。根据 4G 室分部署属性以及话务等信息, 确定场

景化部署方案, 以满足 5G 不同话务需求。同时在满足 4G 高流量和形态特征的建筑物中新建 5G 室分, 主要包括占地面积、建筑高度、建筑物形态特征、话务量等条件。部署流程如图 3 所示。

### 2.3 5G 天线权值规划方案

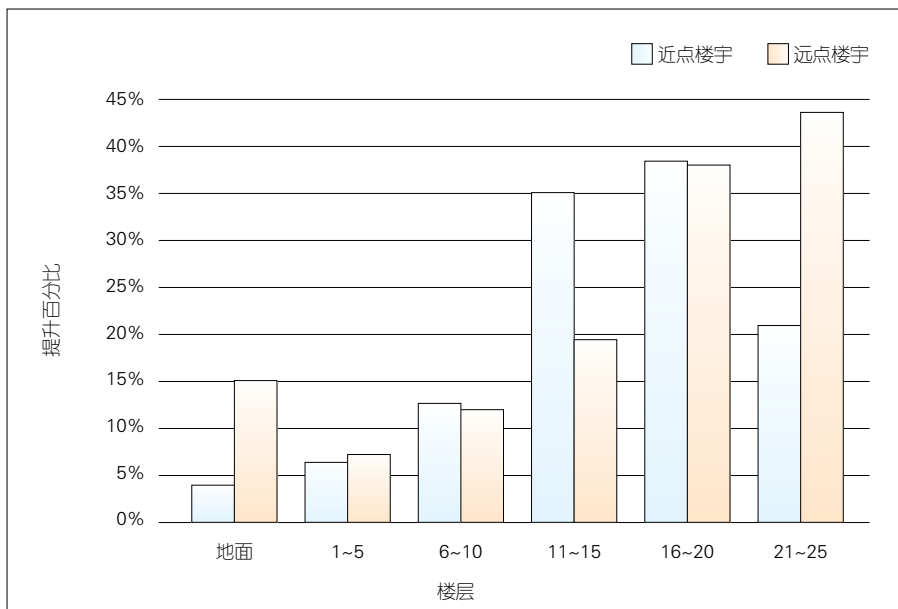
5G 候选站点进行初始参数规划分为两个阶段: 利旧站点参数规划和加站后的参数迭代规划, 主要涉及工程参数规划和广播天线权值规划。

工程参数的下倾角方案。对于利旧站点, 考虑继承 4G 现网下倾和 5G 天线的特性, 采用大机械下倾的策略; 对于新建站, 通过机器学习方法提取城区覆盖环境特性, 预测覆盖效果, 采用理想下倾角。

天线权值规划利用大数据平台完成, 确定优化权值集合, 之后通过自动小区工参优化(ACP)对工程参数和天线权值进行综合寻优。

### 2.3.1 下倾规划方案

8TR 宏站的垂直面 3 dB 宽度很小, 一般只有 6° ~ 8°, 无须设置较大物理下倾角, 即可避免邻区用户终



▲图 2 64 收发通道和 32 收发通道的不同楼层速率实测增益对比

端 (UE) 的上行干扰落入 3 dB 主瓣范围。在 2 GHz 左右频段, 2、4、8 天线情况类似。

对于 64TR 产品, 业务波束垂直面单元 3 dB 宽度达到  $26^{\circ} \sim 28^{\circ}$ , 并且上、下行波形不一致, 对于工参有着不同的需求。

(1) 下行: 信号经过多端口数字权值赋形后, 再从天线发射, 波形已经是各通道加权后的结果。此时波束垂直宽度和传统天线近似, 所对应的工参也同传统天线近似。

(2) 上行: 信号在单个通道接收后, 再通过权值加权合并产生赋形增益。在进入天线时, 波形是单通道的大垂直宽度; 因此需要大机械下倾, 才能避免邻区的噪声抬升 (NI) 落入 3 dB 主瓣接收范围。干扰示意图如图 4 所示。

对于 5G 产品下倾角方案, 采用的方法为增大机械下倾角, 保持 5G 天线和常规天线的上 3 dB 角度一致, 规避上行干扰。同时通过权值调整, 使用合适的广播电子倾角, 保持广播法线方向和常规天线一致。

5G 下倾角设置建议如下:

(1) 初始总下倾角  $\leq 15^{\circ}$ , 则有源天线单元 (AAU) 机械下倾角等同初始总倾角, 下行广播电子倾角为  $0^{\circ}$ 。

(2) 初始总下倾角  $> 15^{\circ}$ , 则 AAU 机械下倾角固定为  $15^{\circ}$ , 不足采用广播电子下倾补充。

(3) 对于高楼垂直覆盖或者存在弱覆盖的情况等场景, 需要结合实际情况设置下倾角。

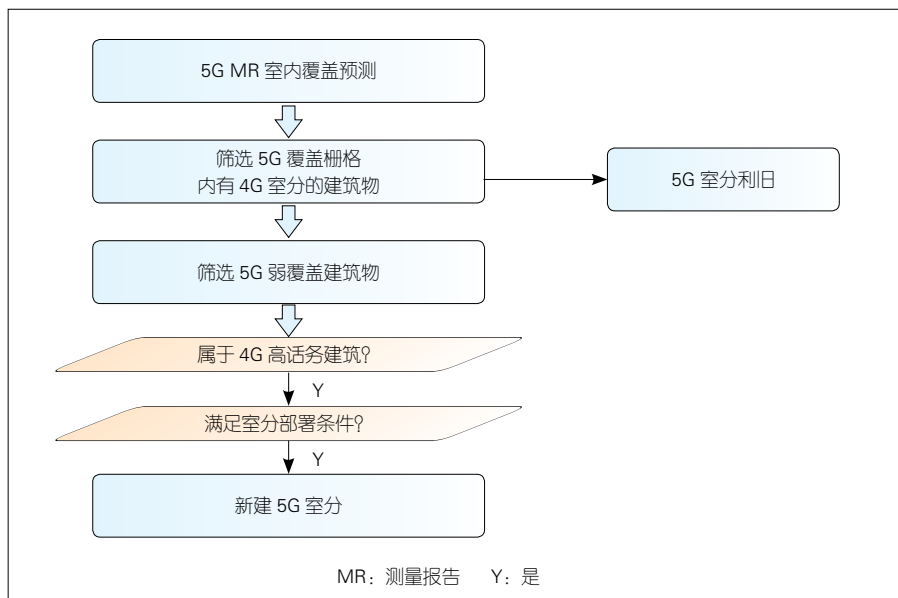
### 2.3.2 天线权值规划

小区覆盖的用户分布是不均匀的, 特别是高层建筑物较多的密集城区。用户的立体分布随建筑物而变化, 这就需要将天线的能量集中于这些用户密集的高价值区域, 以提升用户的

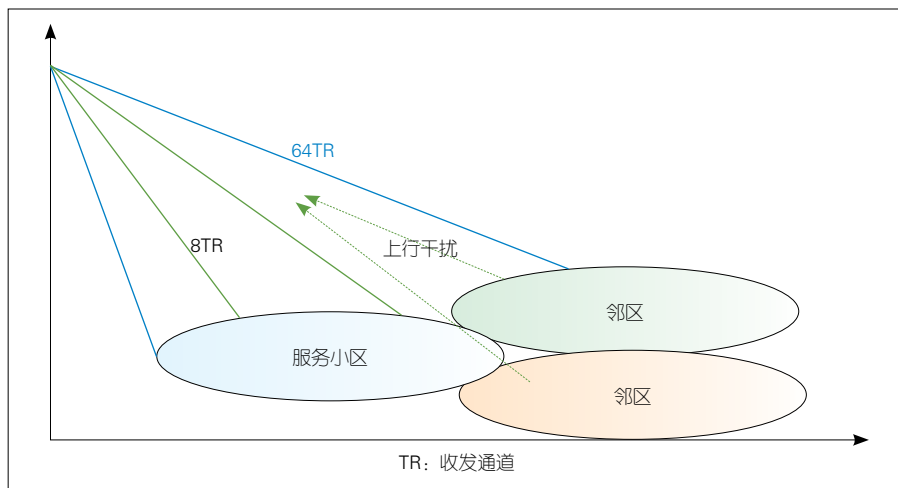
整体体验, 获得更好的投资回报。4G 天线通过宽波束进行方位角和下倾角的整体调整。而 5G 的多波束天线支持 3D 波束赋形, 可以精准打向某个用户密集区域, 从而提升整体的覆盖效率和用户体验。5G 天线权值规划, 是指对 5G 天线权值的天线参数四元组 (水平波瓣宽度、垂直波瓣宽度、下倾角和方位角) 进行规划。5G 天线权值可以产生上万种组合, 在实际建网过程中, 需要根据设备进行选择。然后结合大数据和高精度电子地图, 输出小

区域级精准天线权值规划方案。

中兴通讯网规大数据平台支持基于高精度电子地图和机器学习算法的天线权值规划方案, 并利用工参信息、高精度 3D 电子地图生成 MN 二维点阵图 (点阵图代表该站点覆盖区域内建筑物形态和分布特征)。该大数据平台根据覆盖区域宽度和相邻小区方位夹角, 确定水平波瓣宽度要求; 通过扇区背景建筑物形态分析, 确定垂直波瓣宽度要求; 最终通过扇区背景建筑物形态匹配权值库, 确定站点候选权



▲图 3 5G 室分部署流程



▲图 4 不同波瓣宽度上行干扰示意图

值集合,以准确考虑每个小区的无线环境特征,获取最佳网络性能。表1是使用大数据平台对某个高层建筑较多的小区权值规划的结果。

为应对高层建筑物的立体覆盖需求,垂直波瓣宽度达到 $25^{\circ}$ 的4层权值被采用。针对规划权值,单波束和单层7波束对比验证的实测结果如下:

(1)道路覆盖方面:水平7波束权值配置,理论波束增益最大。根据测试统计数据,相比单波束,水平7波束整体有 $2 \sim 7$  dB增益;相比垂直波束,在其主波瓣方向,有 $2 \sim 5$  dB左右增益。非主瓣范围,覆盖弱于垂直波束。总的来说,在兼顾高楼覆盖场景时,垂直波束配置不会影响道路边缘覆盖率。

(2)楼宇覆盖方面:该小区下96 m高楼建筑内部多层定点测试对比结果,如图5所示。垂直4层波束相

比单层7波束,垂直覆盖范围从 $7^{\circ}$ 变宽到 $25^{\circ}$ 。整体平均约有5 dB增益,低层和高层覆盖约有8 dB增益。总的来说,使用垂直波束能够有效提升高楼室内覆盖率。

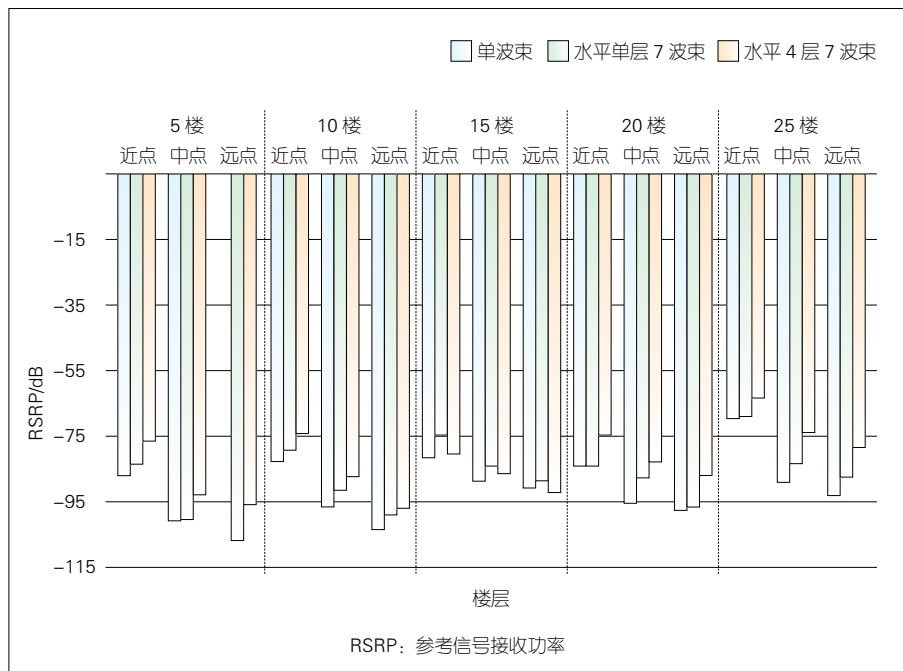
根据测试结果,合理规划5G天线权值,针对性采用多层权值,可以更好地满足建筑物内部立体覆盖需求,在保证道路覆盖率的基础上提升室内覆盖,从而提升整体网络覆盖和性能。

### 3 结束语

基于大规模MIMO天线3D赋形特性,5G场景化网络规划方案依托于大数据平台和高精度电子地图,根据产品特性给出不同场景的规划方案和天线权值的场景化应用。这使得网络规划方案能更精准地匹配网络场景化需求,更好地提升网络覆盖和性能,并为5G网络建设提供有效的落地支撑作用。

▼表1 中兴通讯网规大数据平台对某小区的权值规划结果

频段	波束个数	子波束配置	水平波瓣宽度	垂直波瓣宽度	电子方位角	电子下倾角
3.5 GHz	7	2+2+2+1	$65^{\circ}$	$25^{\circ}$	$10^{\circ}$	$-1^{\circ}$



▲图5 不同波束在建筑物内测试结果对比

随着5G网络的发展,5G场景和业务会越来越复杂,对网络规划的精准化和智能化要求也在日益提升。基于人工智能技术的场景化方案和权值规划方案,将会进一步提升面对复杂场景的网络规划能力。

### 参考文献

- [1] 陆平, 李建华, 赵维铎. 5G在垂直行业中的应用[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(1): 67-74. DOI: 10.12142/ZTETJ.201901011
- [2] LEUNG V C M, ZHANG H J. Ultra-Dense Networking Architectures and Technologies for 5G[J]. ZTE Communications, 2018, 16(2): 1-2. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5188.2018.02.001
- [3] 李珊, 张春明, 汪卫国. 5G商用起步, 融合应用蓬勃兴起[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 2-7. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906001
- [4] 严斌峰, 袁晓静, 胡博. 5G技术与行业应用探讨[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(6): 34-41. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906006
- [5] IMT-2020(5G)推进组. 5G愿景与需求白皮书[EB/OL]. (2014-05)[2020-03-17]. <http://www.imt2020.org.cn/zh/documents/1>
- [6] 3GPP. NR; Physical Layer Procedures for Control: 3GPP TR 38.213[S]. 2018
- [7] IMT-2020(5G)推进组. 大规模天线专题组技术报告[EB/OL]. [2020-03-17]. <http://www.imt2020.org.cn/zh/documents/1>
- [8] 邹广玲, 张守霞, 朱永军, 等. 5G无线智能网络规划方案研究[J]. 电子技术应用, 2019, 45(10): 11-13. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.190980
- [9] 3GPP. Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies: 3GPP TR 38.913[S/OL]. [2020-03-17]. <https://www.3gpp.org/ftp/>

### 作者简介



邹广玲, 中兴通讯股份有限公司无线网络规划总工; 主要研究领域为4G/5G宽带无线区域通信网络规划。



潘彩华, 中兴通讯股份有限公司无线网络规划部部长; 主要研究领域为4G/5G宽带无线区域通信网络规划。



# 《中兴通讯技术》杂志（双月刊）投稿须知

## 一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术，以展现通信技术最新发展动态，并促进产学研合作，发掘和培养优秀人才，为振兴民族通信产业做贡献。

## 二、稿件基本要求

### 1. 投稿约定

- (1) 作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台：[tech.zte.com.cn/submission](http://tech.zte.com.cn/submission)，并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。
- (2) 编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿，并根据审稿意见，公平、公正地录用稿件。审稿过程需要 1 个月左右。

### 2. 内容和格式要求

- (1) 稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。
- (2) 稿件需采用 WORD 文档格式。
- (3) 稿件篇幅一般不超过 6 000 字（包括文、图），内容包括：中、英文题名，作者姓名及汉语拼音，作者中、英文单位，中文摘要、关键词（3 ~ 8 个），英文摘要、关键词，正文，参考文献，作者简介。
- (4) 中文题名一般不超过 20 个汉字，中、英文题名含义应一致。
- (5) 摘要尽量写成报道性摘要，包括研究的目的、方法、结果 / 结论，以 150 ~ 200 字为宜。摘要应具有独立性和自明性。中英文摘要应一致。
- (6) 文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚，上下角的字母、数据和符号的位置皆应明显区别。
- (7) 图、表力求少而精（以 8 幅为上限），应随文出现，切忌与文字重复。图、表应保持自明性，图中缩略词和英文均要在图中加中文解释。表应采用三线表，表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。
- (8) 所有文献必须在正文中引用，文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为：
  - 期刊 [序号] 作者. 题名 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 (期号): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 书籍 [序号] 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版者, 出版年: 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 论文集中析出文献 [序号] 作者. 题名 [C]// 论文集编者. 论文集名 (会议名). 出版地: 出版者, 出版年 (开会年): 引文页码. 数字对象唯一标识符
  - 学位论文 [序号] 作者. 题名 [D]. 学位授予单位所在城市名: 学位授予单位, 授予年份. 数字对象唯一标识符
  - 专利 [序号] 专利所有者. 专利题名: 专利号 [P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符
  - 国际、国家标准 [序号] 标准名称: 标准编号 [S]. 出版地: 出版者, 出版年. 数字对象唯一标识符
- (9) 作者超过 3 人时，可以感谢形式在文中提及。作者简介包括：姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。
- (10) 提供正面、免冠、彩色标准照片一张，最好采用 JPG 格式（文件大小超过 100 kB）。
- (11) 应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。
- (12) 提供联系方式，如：通讯地址、电话（含手机）、Email 等。

### 3. 其他事项

- (1) 请勿一稿多投。凡在 2 个月（自来稿之日算起）以内未接到录用通知者，可致电编辑部询问。
- (2) 为了促进信息传播，加强学术交流，在论文发表后，本刊享有文章的转摘权（包括英文版、电子版、网络版）。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘，请在投稿时说明。
- (3) 编辑部地址：安徽省合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室，邮政编码：230061。
- (4) 联系电话：0551-65533356，联系邮箱：[magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)。
- (5) 本刊只接受在线投稿，欢迎访问本刊投稿平台：[tech.zte.com.cn/submission](http://tech.zte.com.cn/submission)。

# 中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

## 办刊宗旨:

以人为本, 荟萃通信技术领域精英  
迎接挑战, 把握世界通信技术动态  
立即行动, 求解通信发展疑难课题  
励精图治, 促进民族信息产业崛起

---

双月刊 1995 年创刊 总第 151 期

2020 年 4 月 第 26 卷 第 2 期

主管: 安徽出版集团有限责任公司

主办: 时代出版传媒股份有限公司

深圳航天广宇工业有限公司

出版: 安徽科学技术出版社

编辑、发行: 中兴通讯技术杂志社

总编辑: 王喜瑜

主编: 蒋贤骏

执行主编: 黄新明

责任编辑: 徐烨

编辑: 杨广西、卢丹、朱莉、任溪溪

设计排版: 徐莹

发行: 王萍萍

外联: 卢丹

编务: 王坤

---

## 《中兴通讯技术》编辑部

地址: 合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室

邮编: 230061

网址: [tech.zte.com.cn](http://tech.zte.com.cn)

投稿平台: [tech.zte.com.cn/submission](http://tech.zte.com.cn/submission)

电子信箱: [magazine@zte.com.cn](mailto:magazine@zte.com.cn)

电话: (0551)65533356

传真: (0551)65850139

发行范围: 公开发行

印刷: 合肥添彩包装有限公司

出版日期: 2020 年 4 月 25 日

中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868  
CN 34-1228/TN

定价: 每册 20.00 元