动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250812001

硅基模式(解)复用器研究进展

袁富衍[1],张志群[1,2],王　优[1],陈　华[1],方　青[1],吴　岚[1*]

(昆明理工大学1.理学院；2.图书馆,昆明 650500)

摘　要： 硅基模式复用/解复用器作为实现硅基光子集成的核心器件,在光通信与光信息处理领域具有重要应用价值。文章基于不同器件结构类型,系统梳理了硅基模式复用/解复用器的研究进展。综述了硅基集成模式复用技术的发展现状,重点介绍了该领域的核心器件及其性能参数,具体包括硅基集成复用技术体系、复用器的结构设计与特性、基于逆向设计方法的硅基光子器件等关键内容。首先对复用技术的基本原理与分类进行概述,随后分别详细阐述当前主流复用器的工作机制,深入分析各类器件的优势与局限性,并对硅基集成模分复用技术的未来发展趋势进行展望。

关键词： 硅基集成光子器件；模式复用；硅光子学；光互连

中图分类号： TN252;O436　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－0951－08

Research Progress on Silicon-Based Mode (de)Multiplexing Devices

YUAN Fuyan[1], ZHANG Zhiqun[1,2], WANG You[1], CHEN Hua[1], FANG Qing[1], WU Lan[1]

(1. College of Science; 2. Department of Library, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, CHN)

Abstract: Silicon-based mode multiplexers or demultiplexers have significant application value in optical communication and information processing as core devices for silicon photonic integration. This article systematically reviews the advancements in silicon-based mode multiplexers or demultiplexers across various device structures. The article provides a comprehensive overview of the current state of silicon integrated mode multiplexing technology, emphasizing the core devices in this field and their performance parameters. Major topics include the system of silicon integrated multiplexing technology, the structural design and characteristics of multiplexers, and important aspects such as silicon photonic devices utilizing inverse design methods. The review begins by outlining the fundamental principles and classifications of multiplexing technology. This is followed by a detailed exploration of the working mechanisms of current mainstream multiplexers. The review analyzes the advantages and limitations of various devices and anticipates future development trends in silicon integrated mode multiplexing technology.

Key words: silicon photonic integrated devices; mode division multiplexing; silicon photonics; optical interconnect

0　引言

近年来,随着5G通信网络、云计算基础设施以及数据中心的大规模部署,基于绝缘体硅(Silicon-On-Insulator,SOI)平台的片上光互连技术,凭借其

收稿日期：2025－08－12.

基金项目：云南省基金项目(202501AS070048,202201AT070202).

*通信作者：吴　岚

显著的传输容量优势、出色的集成密度和优异的能效特性，已成为突破通信瓶颈、应对指数级增长的数据传输需求的关键技术方案。在此背景下，硅基集成模分复用（Mode Division Multiplexing，MDM）技术通过单个载波上的多个正交空间模式作为独立传输信道，为解决传统波分复用技术带宽限制导致的容量瓶颈问题提供了创新性的解决方案。

在MDM传输系统中，模式复用/解复用器作为核心功能器件，其性能直接决定系统的整体表现。目前，研究界已开发出多种基于硅光子学的模式复用/解复用器结构，主要包括多模干涉耦合型（Multi-Mode Interferometer，MMI）、绝热耦合器（Adiabatic Coupler）、多模光栅辅助耦合器（Multimode Grating-Assisted Coupler）、不对称定向耦合器（Asymmetric Directional Coupler）、锥形定向耦合器（Tapered Directional Coupler）以及Y分支网络结构[1]。

硅基光子集成电路因其与CMOS工艺体系的无缝兼容性及显著的成本优势，并兼具优异的热导率、高波导折射率和卓越的集成能力，在集成光子学领域潜力巨大。当前研究重点聚焦于硅基集成光子器件的性能优化与技术创新，本文系统综述硅基MDM技术的最新研究进展，重点探讨各类模式复用/解复用器的发展现状，并深入分析基于逆向设计方法的硅光子器件研究进展[2]。

1 硅基复用技术

光载波具备多维度的物理特性参数，涵盖时间、相位、波长、幅度、偏振态及横向空间结构等。这些特性为借助多维正交复用技术提升光纤通信容量和频谱效率奠定了理论基础[3]。

如图1所示，当前已有五种基于不同物理维度的复用技术：基于时间窗口分割的光时分复用技术（Optical Time Division Multiplexing，OTDM）[4]、通过多波长并行传输实现容量扩展的波分复用技术（Wavelength Division Multiplexing，WDM）[5]、利用正交偏振态实现双信道传输的偏振复用技术（Polarization Division Multiplexing，PDM）[6]、采用高阶调制编码提升频谱效率的高级调制格式技术[7]和依托多芯或多模光纤实现空间信道倍增的空分复用技术（Space Division Multiplexing，SDM）[8]。

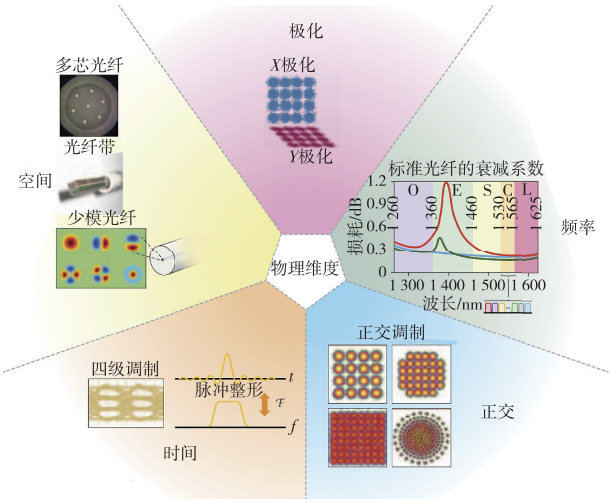


图1 光纤通信复用技术的五个物理维度[3]

2 硅基模式复用系统

在硅光子学领域，片上集成模式复用技术作为突破WDM带宽瓶颈的创新性解决方案，近年来已成为光互连研究的核心方向，受到学术界与工业界的广泛关注。回溯技术发展历程，浙江大学的Dai团队于2012年召开的亚洲通信与光子学会议上，首次公开展示了基于硅基平台的大容量MDM集成系统，其创新架构如图2所示。

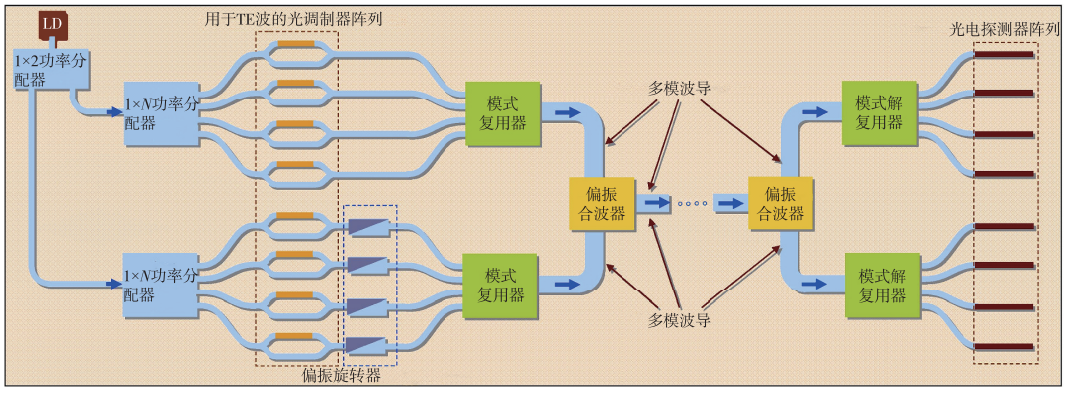


图2 片上硅基模式复用光互连系统示意图[9]

该方案通过构建多维度功能单元协同工作机制，成功实现单载波多通道信号的全流程处理，涵盖模式耦合、光路传输、信号处理及模式解析等核心环节。在器件层面，系统核心组件包括模式调控单元(模式复用/解复用器)、多模传输网络(交叉连接器和弯曲波导)、偏振管理模块(旋转器)以及功率分配装置等基础功能组件。在系统集成层面，进一步引入了模式选择性分路复用、动态可重构光路由及模式转换等多功能模块组。值得注意的是，该架构的发射端创新性地采用宽带光源与无源器件协同工作机制，突破了传统 WDM 系统对多波长激光器和复杂波长控制单元的依赖，在显著提升系统能效比的同时，大幅降低了硬件实现复杂度与制造成本[9]。

3　硅基模式复用/解复用器

模式复用/解复用器是片上 MDM 系统的关键器件。表 1 系统性总结了近年来典型结构的性能参数对比。当前已有多种创新性实现方案被提出，主要包括多模干涉型复用器、遵循绝热模式演化规律的耦合器和基于模式相位匹配条件的非对称定向耦合器(ADC)、光栅辅助耦合与微环谐振器模式复用/解复用器以及可扩展 Y 分支网络结构。

表 1　近年来典型的硅基模式复用结构性能比较

MDM 结构类型	通道数	长度/μm	插入损耗/dB	串扰/dB	是否实验验证
ADC[10]	4	＞78	＜3.9	−23.2～−33.2	是
AC[11]	2	180	＜1.5	＜−19.0	是
MMI[12]	3	17.05	2.4	−14.2	是
PBS＋ADC[13]	5	18.9	＜3.4	＜−15	是
DPWAs[14]	9	141.6	＜～1.0	＜−15.0	是
Inverse Design Y-Junction[15]	2	4.5	1.7	＜−15.5	是
MRR[16]	2	～10	9.7	−25.4	是
MRR＋PBS＋ADC[17]	8	4763	3.0～8.5	−7～−23	是

3.1　多模干涉型

多模干涉型模式解复用器通过多模干涉区的自映像差异实现模式分离，其物理机制源于不同模式在成像平面的相位累计差异。高阶模式在特定成像点处经相移器重构后耦合输出，此类结构在低阶模式复用场景中表现优异，但随着模式阶次增加，其模式串扰抑制能力急剧下降，器件拓扑复杂度成指数级增长。2012 年，Uematsu 等设计并提出一种基于硅纳米线的紧凑型双模复用/解复用器，如图 3 所示，该器件利用蝶形锥形移相器实现带宽操作，数值模拟结果表明其在 C 波段内具有较高的传输效率和良好的制作容差，未来研究可进一步优化器件尺寸，以实现更高效的 MDM 传输[18]。2014 年，中科院半导体研究所的 Li 提出一种基于对称 Y 结和 MMI 波导的紧凑型双模复用/解复用器，该器件在 1 500～1 600 nm 范围内具有高带宽、低串扰和高制作容差的特性，与同期设计相比，该器件在结构紧凑性和工艺鲁棒性具有显著优势，为高密度模式复用集成提供了可行方案，后续可通过优化器件与光纤的耦合效率以提升整体系统性能[19]。2018 年，Truong 等首次实现单片集成三模操作，其在 C 波段内插损小于 0.9 dB，串扰小于−17 dB 且具备良好的制作容差，由于该器件具有全基模输出特性可直接对接现有单模系统，降低系统集成复杂度，该设计为 WDM 和 MDM 的协同传输提供了关键方案[20]。MMI 型模式复用器凭借工艺兼容性、宽光谱及插损低等优势，仍是短距离、低成本光互连的优选方案，但由于尺寸膨胀、高阶模式损耗较大及工艺敏感性等问题，制约了其在高阶模式解复用中的应用。

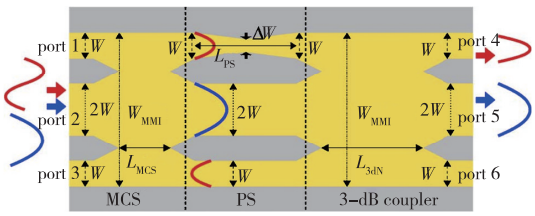


图 3　基于级联 MMI 的模式复用器[18]

3.2　光栅辅助耦合与微环谐振型

光栅辅助耦合器模式复用器通过在波导表面引入光栅结构以增强模式耦合效率；微环谐振器则利用微环谐振腔的波长选择性，结合多模波导实现模式与波长混合复用。2021 年，González-Andrade 等提出一种基于亚波长光栅相移器的宽带模式转换器与复用器，实现了 1 427～1 672 nm 的超宽带

宽，完整MDM链路插损小于2 dB，串扰小于－17 dB，突破了传统相移器的带宽限制，在单一器件上实现了近红外通信波段的全覆盖，为超密集WDM与MDM的协同传输奠定了基础[21]。2023年，González-Andrade等提出一种基于亚波长光栅超材料的宽带三模转换器与复用器，该器件通过创新级联结构（结合4×4 MMI、三个移相器和四组对称Y结）实现四模灵活操作，在1 489～1 650 nm内实现插损小于1.18 dB、串扰小于－20 dB，且器件总长仅181.14 μm，首次在单一架构中实现四模可切换操作，为高维MDM提供新范式[22]。2025年，东南大学Ma等提出一种基于铌酸锂薄膜平台的8通道混合波分/模分复用器，通过非对称定向耦合器和二阶微环谐振腔阵列实现混合复用，将模式解复用器双输出端口互联，使单个微环谐振腔的下载端口复用为两个输出，通道数从4扩至8；实测结果显示，在1 534～1 584 nm范围内模间串扰小于－10 dB，波长通道间相邻和非相邻串扰分别为小于－13.2 dB和小于－27.6 dB，但其对工艺要求较高需进一步优化；这为铌酸锂基光互连提供高通道密度、低串扰、工艺兼容的多维复用方案[23]。光栅辅助耦合型凭借宽带偏振无关及低背反射优势，成为跨平台光接口首选，但其插损及高阶模式性能的不足限制了其在MDM高阶场景的应用；微环谐振型器件以高集成度与可重构性在高密度可调谐系统中占据主导地位，但其温漂与制作敏感性问题仍需进行补偿与校准。

3.3 绝热耦合与非对称定向耦合型

绝热耦合型方案采用非对称锥形波导结构诱导模式选择性激发，其典型结构如图4所示。定向耦合器的创新设计基于耦合模理论，通过精确调控相邻波导的等效折射率匹配点实现模式转换，并借助绝热锥形区实现模式有序叠加。

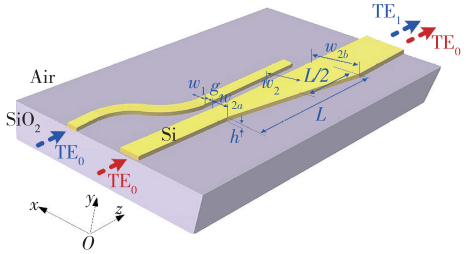


图4 基于锥形定向耦合器的模式复用器[24]

2013年，中科院半导体所Xing等提出一种基于绝热耦合器的双模复用/解复用器，该器件采用双波导同步锥形结构消除传统锥形耦合器在区域交界处的非绝热跃迁，并实现了超低串扰小于－36 dB，较同期锥形耦合器方案提升20 dB以上，且在100 nm带宽内性能保持稳定，为短距离芯片光互连提供高性价比解决方案，未来可通过优化波导工艺进一步逼近理论极限损耗[25]。2015年，华南师范大学-浙江大学光子学联合研究中心Liu提出一种基于密集波导阵列的硅基MDM方案，通过三根宽度差异化波导以100 nm间隙密集排列（等效宽度为1.46 μm）实现模式隔离机制，在15 μm的锥形过渡区实现损耗小于0.05 dB，串扰小于－20 dB，为光互连提供兼具高密度、低串扰、小弯曲特性的MDM方案，规避复杂工艺但其负向弯曲性能较弱的问题、模式扩展需进一步优化波导宽度分布[26]。2016年，华中科技大学Sun等提出一种创新模式转换机制解决传统绝热耦合器与常规多模波导的兼容性问题，通过在绝热耦合器后引入功率分配器和对称Y结将超模转换为常规模式，实现与标准多模总线的无缝集成，在1 525～1 600 nm内串扰小于－20 dB，插损约为1 dB，适用于对损耗敏感的数据中心间连接场景，但其模式扩展性有限，且带宽受限于多模总线中的模式干涉，需进一步优化总线长度[27]。2021年，Paredes等首次在锥形非对称方向耦合器方案中实现O/C波段同步支持，通过创新优化总线波导的锥形范围，使器件同时在C和O波段满足相位匹配条件，在两个波段100 nm带宽范围内实现串扰小于－16 dB，插损小于1.2 dB，器件总长为75 μm，该设计为多维度复用光互连提供基础模块，但其串扰受限于边缘耦合的偏振纯度，且O波段性能低于C波段[28]。2023年，吉林大学Wang等提出一种基于级联定向耦合器的Ge-SiO_2波导四模复用器，核心设计在于级联定向耦合器结构及宽波导偏振不敏感性，由于SiO_2的低损耗特性可补偿复用器插损，该设计适用于长距离的MDM传输系统，但其尺寸限制集成密度，且输出端多模光纤耦合引入较大的附加损耗[29]。绝热耦合型模式复用器具有超宽带特性和较好的工艺容差，但器件尺寸较大，尤其在级联时更为明显，且仅支持固定模式转换无法实现动态重构；非对称定向耦合型的优势主要体现在尺寸紧凑，可通过调整波导宽度实现任意模式选择性耦合，但其带宽相对较窄且工艺敏感性较高。

3.4　Y 分支网络结构型

Y 分支网络通过多级渐变波导实现模式维度扩展，其工艺容差可达±30 nm，结构示意图如图 5 所示。但受限于绝热传输条件，典型 Y 分支器件的纵向尺寸往往超过 200 μm，相较于采用逆向设计优化的定向耦合器结构存在显著的面积劣势。

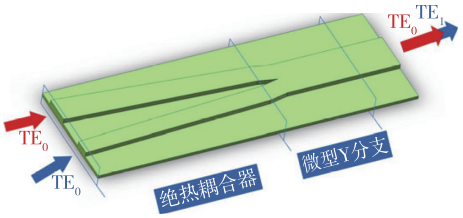
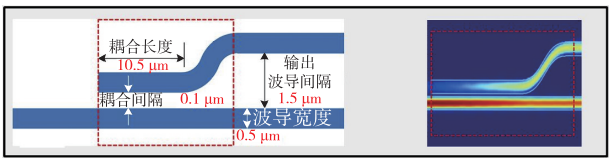


图 5　基于对称 Y 分支的模式复用器[11]

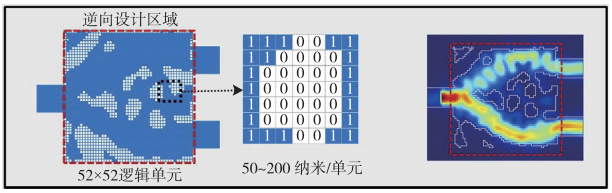
2013 年，美国哥伦比亚大学 Driscoll 等提出一种基于非对称 Y 结的硅波导模式复用器，通过干涉效应实现低串扰模式分离，突破了传统绝热模式分选的限制，在 1 550 nm 插损小于 1.5 dB，C 波段串扰小于－9 dB 且器件尺寸最小长度为 100 μm，具有较高的工艺容差并支持与 WDM 协同，为高密度光子集成提供了新思路，干涉机制避免传统绝热器件的毫米级长度需求，但仍需优化分支点结构以进一步降低插损[30]。2016 年，宁波大学 Chen 等通过级联 Y 结结构和模式演化机制实现三种模式的 MDM，实测 1 537～1 566 nm 范围内串扰为－9.7～－31.5 dB，插损 3.3～5.7 dB，该结构紧凑，且可与 WDM/PDM 协同，但 Y 结分支点最小间隙难以精确实现，需进一步优化刻蚀工艺、减小分支间隙以将串扰降低至理论水平[31]。2017 年，国立成功大学 Chung 等提出一种基于快速准绝热的硅基非对称 Y 结双模复用器，仅通过单参数控制实现 1 550 nm 处串扰小于－34 dB，1 400～1 700 nm 带宽内串扰小于－20 dB 且相较传统 Y 结设计显著降低器件长度，但该器件对分支起始间隙工艺要求高，实际应用中需牺牲部分性能且未验证 TM 模兼容性[32]。Y 分支网络结构型凭借工艺简易性和低插损的优势在低阶模式复用仍是优选方案，但存在高阶模式串扰严重、灵活性不足等问题。

4　硅基模式复用器的逆向设计

在硅基光子器件设计领域，基于经验积累与物理模型构建的迭代优化范式长期占据主导地位。如图 6 所示，此类方法学通常遵循以下技术路线：首先依据光波导模式调控理论及已知物理效应建立原型结构，然后通过参数化扫描或手动调整几何参数实现性能调优。该技术路径已被证实在构建阵列波导光栅、微环谐振腔、光子晶体及超构表面等核心器件时具有工程可行性，并由此形成相对完整的硅基光子器件工艺库[33-37]。



(a) 基于传统设计的硅基光波导耦合器



(b) 基于逆向设计的硅基光波导耦合器

图 6　基于正逆向设计的光波导耦合器[38]

然而，随着硅光集成技术向超紧凑、多功能及多物理场耦合方向演进，传统经验驱动型设计策略逐渐显现出方法论层面的局限性。具体表现为：缺乏系统化的优化路径，导致参数调整存在盲目性；自由度数受限，难以实现亚波长尺度下的精细结构优化；设计周期与研发成本呈指数级增长，难以满足大规模光子集成电路的设计需求。这些技术瓶颈严重制约硅基光电器件在带宽扩展、功能集成及能效优化等方面的性能突破。

近年来，逆向设计策略在硅基光子器件领域引发了设计范式的革新。这种以特定功能需求为驱动的智能化设计体系，凭借全局参数优化能力和先进的光场操控特性，突破了传统经验设计模式的理论局限，在实现亚波长级微型化器件、拓展新型功能架构方面展现出显著优势。其技术路径主要包含三个核心环节：首先基于应用场景明确定义目标函数与设计域，然后通过智能算法自主探索多维参数空间的最优解，最终依托高精度微纳加工技术实现物理器件的制备。该方法的工程价值在于将先进计算科学与现代半导体工艺深度融合，为开发多功能集成、高性能光波导系统提供了创新解决方案[39]。

从微结构特征维度分类，逆向设计方法可划分为两类典型范式。第一类是数字型亚波长结构设计，主要采用直接二进制搜索、遗传算法及改进型

粒子群优化等离散化方法，其设计单元具有规则几何形态与统一特征尺寸，在保证良好工艺兼容性的同时，通过参数化建模提升器件鲁棒性。例如，清华大学团队开发的低维傅里叶频域优化法，通过约束器件结构的低频分量有效降低了设计复杂度。第二类是模拟型设计，依托伴随场梯度法或拓扑优化等连续参数优化算法，利用单次迭代即可获取全域参数梯度信息，显著提升收敛效率。然而，该类方法易产生非规则纳米结构，对制造误差的敏感性限制了其实际应用[38]。

两类方法在工程实现层面呈现显著差异性特征：直接二进制搜索等数字型算法虽具有优异的工艺适应性，但其串行优化机制导致计算效率较低；相较之下，北京大学团队提出的混合逆向设计算法，通过融合伴随法与几何约束策略，成功实现了特征尺寸仅4 μm的超紧凑定向耦合器。在模拟型设计领域，武汉团队发展的数字化伴随法创新性地将传统二值化结构拓展至多值化体系，既保持了梯度算法的高效性，又将器件性能衰退控制在0.5 dB以内。如图7所示为基于逆向设计的模式复用器的典型结构示意图。

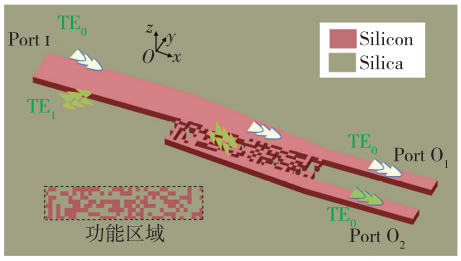


图7 基于逆向设计的锥形模式复用器[40]

2021年，宁波大学Chen等提出粒子群优化和有限差分时域法联合的方案，通过级联反锥结构和粒子群算法优化反锥形耦合器分段宽度，实现四模操作且器件总长仅27 μm，为同类最小，实测1 550 nm波长串扰小于－27 dB，1 525～1 561 nm带宽内串扰小于－18.12 dB，该设计适合高密度集成，但实测插损较高，且角度容差有限需进一步提升工艺一致性[41]。2023年，合肥工业大学Wang等提出一种基于伴随法逆向设计的非对称Y结模式复用/解复用器，实测级联系统在1 453～1 580 nm带宽内串扰小于－15.5 dB，且尺寸仅为4.5 μm×1.2 μm或6 μm×1.4 μm，该设计尺寸与带宽方面达到同类工作的标杆水平、扩展性好但其实测较仿真性能恶化明显，部分模式转换插损偏高需进一步提升工艺的侧壁精度[15]。2025年，燕山大学Qiao等提出首个全逆向设计多维复用电路，实现6波长×3模式×2偏振即36通道混合复用，器件面积仅为127 μm×90 μm，通过逆向设计构建了波长解复用器、偏振旋转分束器、模式解复用器等多功能器件，实测在1 480～1 620 nm带宽内插损为9.2～14.7 dB且串扰小于－10 dB，对此可以通过减少通道数或引入光子晶体滤波器降低插损，或利用高精度光刻减小纳米孔尺寸误差，该方案验证了逆向设计在超密集多维复用系统的可行性，为太比特每秒量级芯片光互连奠定基础[42]。同年，燕山大学Wu等提出一种基于逆向设计亚波长光栅的超紧凑模式复用器，创新性采用级联式无锥形过渡设计，可实现双偏振八通道，六通道实测1 550 nm处插损为0.21～0.77 dB，在1 500～1 600 nm带宽范围内串扰小于－15 dB，单模转换单元长度仅为5.8～15 μm较传统非绝热耦合器缩短80%，且具有较强的工艺容差。该设计扩展性好、尺寸紧凑但高阶模插损较高，TE光栅耦合器反射导致光谱震荡，未来可通过优化亚波长光栅单元形状进一步抑制损耗。粒子群优化算法实现的超短耦合与无锥形级联，为高密度集成光子电路提供新方案[43]。这些技术突破推动着逆向设计方法向着更高集成度、更强功能性的方向发展，为新一代硅基光子芯片的研制奠定了重要基础。

5 结论

为应对高速数据通信对带宽需求的持续增长，硅基模式复用技术近年来成为集成光子学领域的研究热点。本文以国内外进展作为出发点，系统介绍了硅基集成复用技术及其系统，针对模式复用器的结构分类，对比分析了当前主流模式复用器的性能特性，最后对模式复用器的逆向设计进行系统阐述。

在数据中心光互连领域，硅基模式复用器需满足高带宽、低功耗、低延迟、高集成度及工艺兼容性等核心需求。目前主流技术路线包括数字超材料复用器、微环谐振器阵列、异质集成结构及多层波导结构等。结合最新研究进展和产业化需求，数字超材料复用器和微环谐振器阵列在性能与实用性方面表现尤为突出，前者以极限性能主导高端市场，后者则以平衡性推动规模化落地。其中数字超材料复用器因逆向设计的优势能够实现高密度模式复用极大缩小器件尺寸，并显著降低光路复杂

度；微环谐振器阵列则是结合多模微环谐振器与WDM显著提升复用数量，其自由光谱范围大且串扰抑制表现好。

当前该领域面临的挑战及未来发展方向如下：对于以微环谐振器阵列复用器为代表的传统设计，核心挑战在于热管理瓶颈，其温漂敏感性问题需通过热调谐电路进行补偿；而数字化超材料复用器则存在工艺实现难度高的问题，其设计需求超出主流深紫外光刻130 nm的分辨率极限，依赖电子束光刻，目前仍处于实验室原型阶段，短期内难以替代传统设计方案。未来主要突破方向在于算法与工艺的协同优化、异构集成方案的采用以及深紫外光刻的兼容性设计等。

参考文献：

[1] 李晨蕾，戴道锌．硅基纳米光子集成回路中的模式转换与耦合[J]．激光与光电子学进展，2017，54(5)：40-55.
Li Chenlei，Dai Daoxin. Mode conversion and coupling in silicon-based nanometer photonic integrated circuits[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2017，54(5)：40-55.

[2] 刘　柳，陈楷旋．硅基片上模式复用技术进展[J]．华南师范大学学报(自然科学版)，2016，48(1)：28-34，2.
Liu Liu，Chen Kaixuan. Mode division multiplexing on a silicon chip[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)，2016，48(1)：28-34，2.

[3] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. Nature Photonics，2014，8(5)：345-348.

[4] Tucker R S，Eisenstein G，Korotky S K. Optical time-division multiplexing for very high bit-rate transmission[J]. Journal of Lightwave Technology，1988，6(11)：1737-1749.

[5] Brackett C A. Dense wavelength division multiplexing networks：principles and applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications，2006，8(6)：948-964.

[6] Hayee M I，Cardakli M C，Sahin A B，et al. Doubling of bandwidth utilization using two orthogonal polarizations and power unbalancing in a polarization-division-multiplexing scheme[J]. IEEE Photonics Technology Letters，2001，13(8)：881-883.

[7] Cho J，Chen X，Chandrasekhar S，et al. Trans-Atlantic field trial using high spectral efficiency probabilistically shaped 64-QAM and single-carrier real-time 250-Gb/s 16-QAM[J]. Journal of Lightwave Technology，2018，36(1)：103-113.

[8] Richardson D J，Fini J M，Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics，2013，7(5)：354-362.

[9] Dai D. Silicon mode-(de)multiplexer for a hybrid multiplexing system to achieve ultrahigh capacity photonic networks-on-chip with a single-wavelength-carrier light [C]//2012 Asia Communications and Photonics Conference，2012：1-3.

[10] Yin Y，Yu H，Tu D，et al. A silicon-based on-chip 64-channel hybrid wavelength- and mode-division (de) multiplexer[J]. Photonics，2023，10(2)：183.

[11] Zhang Z，Yu Y，Fu S. Broadband on-chip mode-division multiplexer based on adiabatic couplers and symmetric Y-junction[J]. IEEE Photonics Journal，2017，9(2)：6600406.

[12] Wang Z，Yao C，Zhang Y，et al. Compact silicon three-mode multiplexer by refractive-index manipulation on a multi-mode interferometer[J]. Optics Express，2021，29(9)：13899-13907.

[13] Jiang W，Xie L，Zhang L. Design and experimental demonstration of a silicon five-mode (de)multiplexer based on multi-phase matching condition[J]. Optics Express，2023，31(20)：33343-33354.

[14] Xu H，Shi Y. Broadband nine-channel mode-division (de) multiplexer based on densely packed multimode waveguide arrays[J]. Journal of Lightwave Technology，2017，35(22)：4949-4953.

[15] Wang Q，Wang W，Sun R，et al. Inverse design of asymmetric Y-junctions for ultra-compact，broadband，and low crosstalk mode (de) multiplexers[J]. Optics Express，2023，31(22)：37284-37301.

[16] Gostimirovic D，Ye W N. Compact silicon-photonic mode-division (de)multiplexer using waveguide-wrapped microdisk resonators[J]. Optics Letters，2021，46(2)：388-391.

[17] Yu H，Tu D，Yin Y，et al. Monolithically integrated 128-channel hybrid mode/polarization/wavelength (de)multiplexer on silicon-on-insulator[J]. Optics Express，2023，31(25)：41034-41045.

[18] Uematsu T，Ishizaka Y，Kawaguchi Y，et al. Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multimode interference waveguides and a wavelength-insensitive phase shifter for mode-division multiplexing transmission[J]. Journal of Lightwave Technology，2012，30(15)：2421-2426.

[19] Li Y，Li C，Li C，et al. Compact two-mode (de)multiplexer based on symmetric Y-junction and Multimode interference waveguides[J]. Optics Express，2014，22(5)：5781-5786.

[20] Truong C D，Nguyen T H，Pham Q T，et al. Three-mode multiplexer and demultiplexer utilizing trident and multimode couplers[J]. Optics Communications，2019，435：334-340.

[21] González-Andrade D，de Cabo R F，Vilas J，et al. Mode converter and multiplexer with a subwavelength phase shifter for extended broadband operation [J]. IEEE Photonics Technology Letters，2021，33(22)：1262-1265.

[22] González-Andrade D，Olivares I，Fernández de Cabo R，et al. Broadband three-mode converter and multiplexer based on cascaded symmetric Y-junctions and subwavelength engineered MMI and phase shifters[J]. Optics & Laser Technology，2023，164：109513.

[23] Ma Q, Zhu W, Wang Q, et al. An eight-channel hybrid wavelength-/ mode-division (de)multiplexer based on LNOI platform[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2025, 37(13): 741-744.

[24] Ding Y, 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.

[25] Xing J, Li Z, Xiao X, et al. Two-mode multiplexer and demultiplexer based on adiabatic couplers[J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3468-3470.

[26] Liu L. Densely packed waveguide array (DPWA) on a silicon chip for mode division multiplexing [J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12135-12143.

[27] Sun C, Yu Y, Ye M, et al. An ultra-low crosstalk and broadband two-mode (de) multiplexer based on adiabatic couplers[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 38494.

[28] Paredes B, Mohammed Z, Villegas J, et al. Dual-band (O & C-bands) two-mode multiplexer on the SOI platform [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(3): 6600309.

[29] Wang M, Sun X, Liu T, et al. Silica waveguide four-mode multiplexer based on cascaded directional couplers [J]. Photonics, 2023, 10(9): 983.

[30] Driscoll J B, Grote R R, Souhan B, et al. Asymmetric Y junctions in silicon waveguides for on-chip mode-division multiplexing[J]. Optics Letters, 2013, 38(11): 1854-1856.

[31] Chen W, Wang P, Yang T, et al. Silicon three-mode (de) multiplexer based on cascaded asymmetric Y junctions [J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2851-2854.

[32] Chung H C, Lee K S, Tseng S Y. Short and broadband silicon asymmetric Y-junction two-mode (de) multiplexer using fast quasiadiabatic dynamics[J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13626-13634.

[33] Pita Ruiz J L, Nabki F, Ménard M. Silicon nitride TM-pass polarizer using inverse design[J]. Optics Express, 2023, 31(23): 37892-37899.

[34] Dong T, Han Z, Sheng D, et al. Artificial neural network assisted the design of subwavelength-grating waveguides for nanoparticles optical trapping[J]. Optics Express, 2024, 32(6): 9656-9670.

[35] Huang X, Li J, Wang Z, et al. Ultra-compact narrow-band band-stop filter based on inverse design[J]. AIP Advances, 2024, 14(10): 105213.

[36] Wang L, Zhou H, Shi H, et al. Ultra-low loss and ultra-compact polarization-insensitive SOI multimode waveguide crossing based on an inverse design method[J]. Photonics, 2024, 11(12): 1137.

[37] Wang Y, Fan H, Yuan Z, et al. Ultra-compact 1 × 4 optical power splitter based on variable-length segment optimized inverse design[J]. IEEE Photonics Journal, 2024, 16(6): 6601708.

[38] 常卫杰. 硅基集成亚波长模式复用光子器件及其逆向设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
Chang Weijie. Research on silicon-based integrated subwavelength mode division multiplexed photonic devices and their reverse design[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[39] 刘英杰. 基于数字型超构波导的硅基多维复用器件研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 13-20.
Liu Yingjie. Silicon-based multiplexing devices with digital meta-structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022: 13-20.

[40] Jiang W, Mao S, Hu J. Inverse-designed counter-tapered coupler based broadband and compact silicon mode multiplexer/demultiplexer [J]. Optics Express, 2023, 31(20): 33253-33263.

[41] Chen W, Li H, Zhang B, et al. Silicon mode (de) multiplexer based on cascaded particle-swarm-optimized counter-tapered couplers[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(1): 6600210.

[42] Qiao X, Li Y, Liu Y, et al. Inverse-designed multidimensional-division-multiplexing photonic circuits for dense integration[J]. ACS Photonics, 2025, 12(6): 3256-3264.

[43] Wu R, Wang X, Qiao X, et al. Compact and scalable mode (de) multiplexer using inverse-designed subwavelength gratings[J]. Optics Express, 2025, 33(5): 11541-11554.

作者简介：

袁富衍(2001—)，男，云南省昭通市人，硕士研究生，主要从事硅基模式复用器方面的研究；

吴　岚(1980—)，女，云南省昆明市人，硕士，工程师，主要从事硅光子器件方面的研究。