中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0653-16 J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 653-668.

面向全光计算的硅基高非线性波导研究

王永华[1]，雷 蕾[2]

(1. 中北大学 信息与通信工程学院，山西 太原 030051；2. 深圳大学 物理与光电工程学院，广东 深圳 518060)

摘 要：人工智能算力的爆发式增长对信息处理系统的带宽、速度和能耗提出了前所未有的要求，传统电子集成技术在逼近物理极限后日趋放缓，光互连与光计算成为突破上述瓶颈的重要途径。硅基光子集成器件凭借与CMOS工艺兼容、结构紧凑和低损耗等优势，成为实现片上光逻辑运算的理想平台，但硅材料固有的双光子吸收效应和自由载流子吸收效应严重制约了其非线性过程的效率和速度。围绕上述问题，本文对硅基光波导非线性增强技术及其在光逻辑运算中的应用进行了系统梳理，从狭缝波导、石墨烯异质集成和多模波导三个方向展开论述。狭缝波导部分介绍了从硅基-聚合物复合结构到等离子体结构的发展脉络，讨论了不同方案的性能提升效果及固有局限。石墨烯部分阐述了其三阶非线性的物理来源、费米能级电控调谐的基本原理以及与硅波导集成时的关键工艺问题。多模波导部分梳理了模式选择性波长转换和并行逻辑运算的相关进展。在此基础上，本文还讨论了当前制约器件性能的工艺、调控与模式扩展问题，并对材料体系、制造工艺和集成架构的可能发展方向进行了展望。

关键词：硅基光子学；非线性器件；石墨烯；多模波导

中图分类号：TN252 **文献标识码：**A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.07.0023

引用格式：王永华，雷蕾. 面向全光计算的硅基高非线性波导研究[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：653-668.

Wang Yonghua, Lei Lei. Silicon-based high-nonlinear waveguide research for all-optical computing[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 653-668.

Silicon-Based High-Nonlinear Waveguide Research for All-Optical Computing

Wang Yonghua[1], Lei Lei[2]

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The explosive growth of artificial intelligence computing power has placed unprecedented demands on the bandwidth, speed, and energy consumption of information processing systems. As traditional electronic integration technologies approach their physical limits and progress slows, optical interconnects and photonic computing have emerged as key pathways to overcome these bottlenecks. Silicon-based photonic integrated devices, with advantages such as compatibility with CMOS processes, compact structure, and low loss, have become an ideal platform for on-chip photonic logic operations. However, the inherent two-photon absorption and free-carrier absorption effects in silicon severely limit the efficiency

收稿日期：2026-07-24
基金项目：国家自然科学基金(62205308)
作者简介：王永华(1987—)，男，讲师，博士，主要从事测试计量技术及仪器方面的研究。E-mail：wangyonghua@nuc.edu.cn。

and speed of nonlinear processes. Addressing these challenges, this paper systematically reviews silicon-based nonlinear enhancement techniques in optical waveguides and their applications in photonic logic operations, focusing on three directions: slot waveguides, graphene hetero-integration, and multimode waveguides. The section on slot waveguides traces the evolution from silicon-polymer composite structures to plasmonic structures, discussing performance improvements and intrinsic limitations of different approaches. The graphene section explains the physical origins of its third-order nonlinearity, the fundamental principles of electrically tunable Fermi level control, and critical fabrication issues in integrating graphene with silicon waveguides. The multimode waveguide section summarizes recent advances in mode-selective wavelength conversion and parallel logic operations. Building on this foundation, the paper further discusses current technological constraints related to fabrication, control, and mode expansion, and outlines potential future directions for material systems, manufacturing processes, and integration architectures.

Key words: silicon photonics; nonlinear devices; graphene; multimode waveguide

0 引 言

人工智能大模型的爆发式增长正在重构全球信息产业的底层逻辑。自2018年ChatGPT问世以来，生成式人工智能(Generative Artificial Intelligence,GAI)对算力基础设施的需求呈指数级攀升。据国际数据公司(IDC)发布的《Worldwide IDC Global Data Sphere Forecast Update, 2025—2029: Regional Analysis》报告[1]，2025年全球将产生213.56 ZB数据，到2029年将增长1倍以上(达到527.47 ZB)，其中近30%需要实时处理。如此海量的数据对信息处理系统的容量、速度和能耗提出了前所未有的挑战。然而，随着晶体管特征尺寸逐渐逼近纳米尺度，摩尔定律正接近物理极限，传统电子集成电路的性能提升日趋放缓。下一代AI基础设施需要大量的光学连接，铜线已无法满足计算需求的快速增长。在此背景下，用光信号替代电信号进行计算和数据处理，成为突破电子技术瓶颈的重要途径。

相比于电子，光子作为信息载体具有显著优势：光子之间干扰弱、不同波长可并行传输，具有大带宽、高速度和低功耗等特性。自20世纪80年代以来，硅基光子集成器件[2]经历了快速发展，受益于与CMOS工艺的高度兼容性，已在光互连[3-5]、光通信[6-8]、光计算[9-11]和光传感[12-14]等领域展现出广阔的应用前景。同时，全光信号处理技术由于能够避免光-电-光转换带来的速率限制，在构建下一代高速、高能效光通信网络中显示出巨大潜力[15-19]。全光波长转换是全光计算的关键技术[20-23]，其效率依赖于光传输的非线性介质，类比于晶体管在电子电路中的基础性作用，非线性光波导正是光域中承担这一角色的关键器件。用于全光波长转换的光学非线性波导介质种类很多，常用的非线性介质包括非线性光纤[24-26]、硫系波导[27-28]、Ⅲ－Ⅴ族化合物波导[29-31]、氮化硅波导[32-34]和硅基波导[35-37]等。虽然硅的三阶非线性系数小于Ⅲ－Ⅴ族半导体和非线性光学晶体[38]，但是在基于SOI材料的硅波导中，由于硅和空气间的折射率差很大，而且波导的尺寸很小，一般为亚波长量级，因此硅波导对光波具有很强的约束能力，能够获得很高的光功率密度，目前，硅波导中的光功率密度已经达到了传统单模光纤的1 000倍以上，不仅如此，硅的克尔系数约为$10^{-18}m^2/W$[39]，比光纤中氧化硅[40]高两个数量级以上，综合来看，硅波导的非线性系数比二氧化硅高5个数量级以上，也就是说，需要几公里长度的单模光纤才能实现的非线性效应，用毫米级的硅波导就可实现，因此，硅基非线性波导器件性能提升是实现片上高速光逻辑运算亟待突破的核心任务。

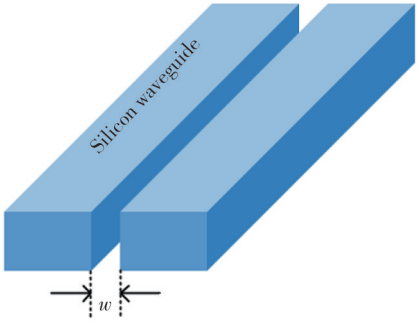
硅基波导的非线性性能强烈依赖于器件的非线性转换效率。转换效率的提升途径主要有三种：增大输入光功率、增加非线性作用长度和增大器件本身的非线性系数。其中，增大非线性系数是最具芯片化可行性的方案。硅材料虽然具有较高的克尔系数，但硅材料本身的双光子吸收效应(Two-Photon Absorption, TPA)和由此产生的自由载流子吸收效应(Free-Carrier Absorption, FCA)会引入额外的吸收损耗，严重限制了器件的

非线性效率和响应速度。为突破这一瓶颈，研究者们从多个方向开展了探索：1）通过狭缝波导结构将光场限制在纳米尺度狭缝中，提高光功率密度；2）引入石墨烯等具有超高克尔系数的二维材料，通过异质集成大幅提升器件非线性强度；3）利用多模波导实现模分复用，在单一物理链路上并行处理多路光信号，提升通信容量。本文将从这三个方面系统梳理相关研究进展，并对硅基石墨烯多模狭缝波导这一新兴研究方向的发展趋势进行展望。

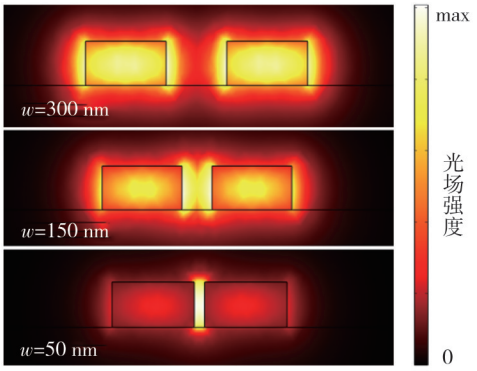
1　硅基狭缝波导非线性器件

1.1　狭缝波导光场局域原理

狭缝波导（Slot Waveguide）是近年来集成光子学领域的一项突破性波导结构，与传统条形波导将光场限制在高折射率核心区域不同，其为能够将光场超强限制在纳米尺度低折射率狭缝中传输的波导结构，如图 1（a）所示。其基本原理源于电磁场的边值关系：当两个高折射率波导相互靠近到一定程度时，光场会在低折射率区域（狭缝）中得到显著增强，此时光场绝大部分被限制在狭缝中，如图 1（b）所示。这种增强效应随狭缝宽度 w 的减小呈指数型增长。由于光功率密度与模式有效面积成反比，狭缝波导能够在极短的作用长度内实现强非线性效应，因此其已成为硅基高非线性波导的重要结构。过去十几年间，狭缝波导已在多种材料平台上得到验证，包括硅[41-43]、聚合物[44]、硫系波导[45]、铌酸锂[46-47]、III-V 族半导体[48]以及新兴的二维材料[49-50]等。在非线性光学领域，基于不同材料体系的狭缝波导呈现出各具特色的优势，下面将重点介绍其中几类最具影响力的代表性工作。



（a）硅基狭缝波导结构示意图



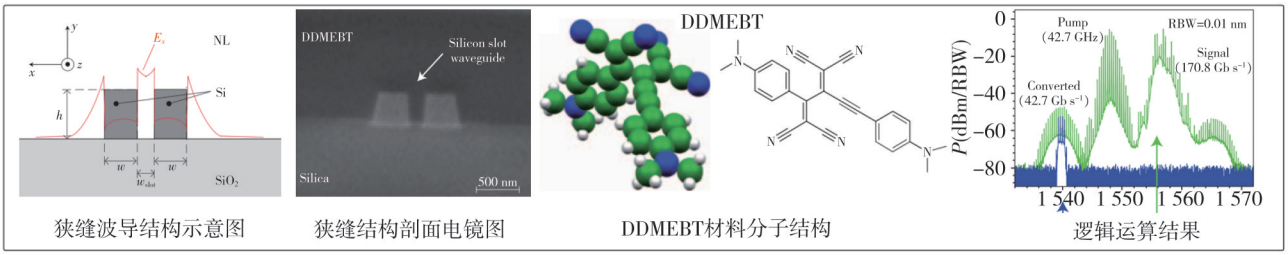
（b）狭缝模场分布仿真图

图 1　硅基狭缝波导结构及其光场分布

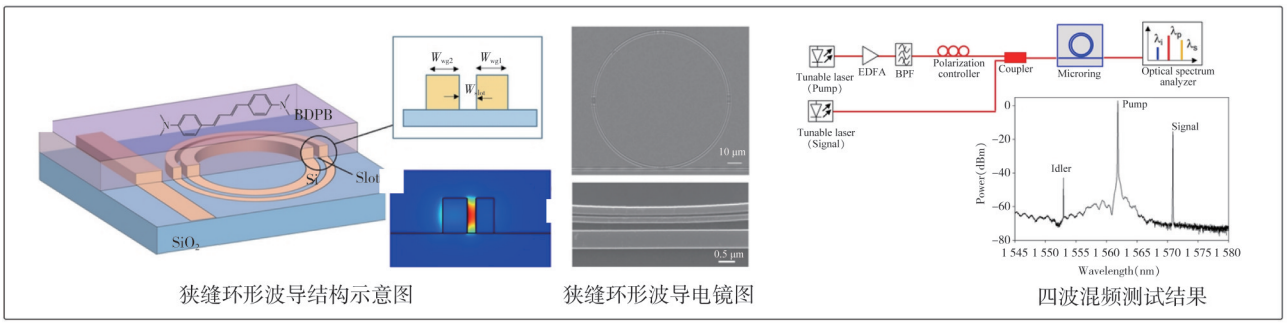
Fig. 1　Silicon-based slot waveguide structure and its optical field distribution

1.2　硅基-高非线性聚合物狭缝波导

硅基-聚合物（Silicon-Organic Hybrid，SOH）狭缝波导是最早被提出的高非线性狭缝波导方案。其核心思想是将具有高克尔系数的有机非线性材料填充至硅基狭缝中，利用狭缝波导的高光场局域能力将光限制在狭缝中传播，同时利用有机材料的高非线性弥补狭缝中非线性材料的缺失，由于光场大部分被限制在狭缝中，可大幅降低硅材料本身的 TPA 和 FCA 效应，从而实现高非线性。首次提出高非线性聚合物与硅基狭缝波导相集成方案是 Koos 团队[51]，他们将具有高三阶非线性系数的有机聚合物 DDMEBT（2-［4-（dimethylamino）phenyl］-3-（［4-(dimethylamino)phenyl]ethynyl)buta-1,3-diene-1,1,4,4-tetracarbonitrile，2-[4-(二甲氨基)苯基]-3-（[4-(二甲氨基)苯基]乙炔基)丁-1,3-二烯-1,1,4,4-四甲腈）填充到硅基狭缝中，利用狭缝波导的高光场局域能力将光限制在狭缝中传输，从而大幅减小硅材料本身的 TPA 效应，如图 2（a）所示，利用这种硅基-聚合物狭缝波导，他们在仅 4 mm 的器件长度上便实现了四波混频效应，并成功将 170.8 Gbit/s 的高速信号解复用到 42.7 Gbit/s，器件的非线性系数达到 100 $W^{-1}\cdot m^{-1}$。2022 年，Hong 等[52]报道了一种基于硅基狭缝微环谐振腔的非线性器件。该器件采用非对称硅基狭缝波导结构，狭缝中填充高三阶非线性系数且 FCA 可忽略的有机分子 BDPB（1,4-bis[4-(dimethylamino)phenyl]-1,3-butadiene，1,4-双[4-(二甲氨基)苯基]-1,3-丁二烯），在泵浦功率低于 1.0 mW 的条件下，实现了—27.4 dB 的四波混频转换效率，基于实验数据提取的波导非线性参数 γ 约为 1 034 $W^{-1}\cdot m^{-1}$。



(a) Koos团队的硅基-高非线性聚合物狭缝波导结构、电镜图及光逻辑运算结果[51]

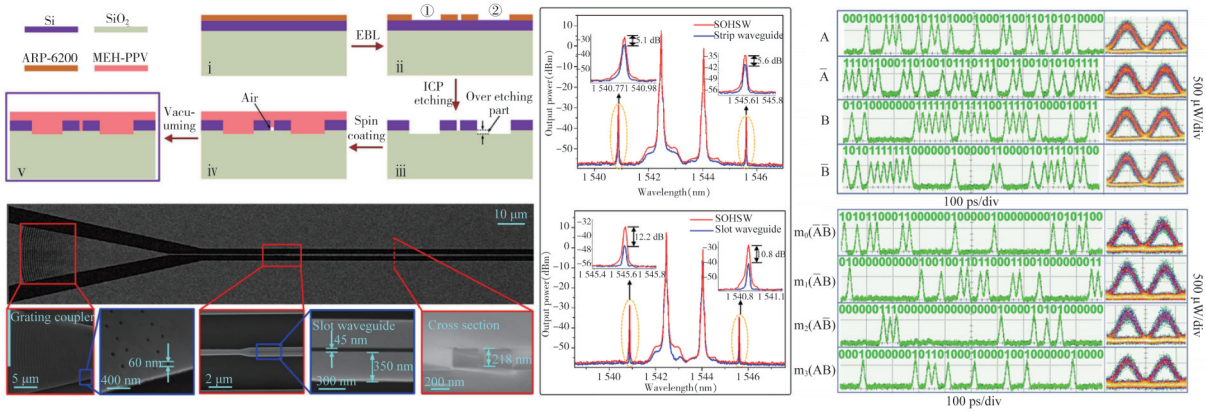


(b) Hong团队的硅基微环-高非线性聚合物狭缝波导结构、电镜图及四波混频测试结果[52]

图2 硅基-聚合物高非线性波导器件

Fig. 2 Silicon-based polymer high nonlinear waveguide devices

2022年，本团队报道了一种超窄硅基-聚合物狭缝波导[53]。团队利用高分辨率电子束光刻机EBPG 5150成功制备出了线宽小于50 nm的狭缝波导，并通过调整感应耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma，ICP)刻蚀参数实现了极窄狭缝的全深度刻蚀，刻蚀深度约为220 nm，狭缝宽度仅为45 nm，如图3(a)所示。将高非线性聚合物MEH-PPV(Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene],[2-甲氧基-5-(2-乙基己氧基)-1,4-苯撑乙烯撑])填充到硅基狭缝中，以增强器件的非线性，并利用四波混频效应测试了器件的非线性性能，如图3(b)所示，转换效率相比无聚合物的狭缝波导提高了12 dB以上，相比硅条形波导提高了5 dB以上。基于该器件，本团队成功实现了40 Gbit/s的全光逻辑与运算，获得了清晰的时序波形和宽张开的眼图，验证了硅基-高非线性聚合物狭缝波导在高速全光信号处理中的应用潜力，如图3(c)所示。



(a) 超窄狭缝波导工艺及其电镜图 (b) 四波混频测试对比 (c) 40 Gbit/s全光逻辑与运算结果

图3 本团队硅基-聚合物高非线性波导[53]

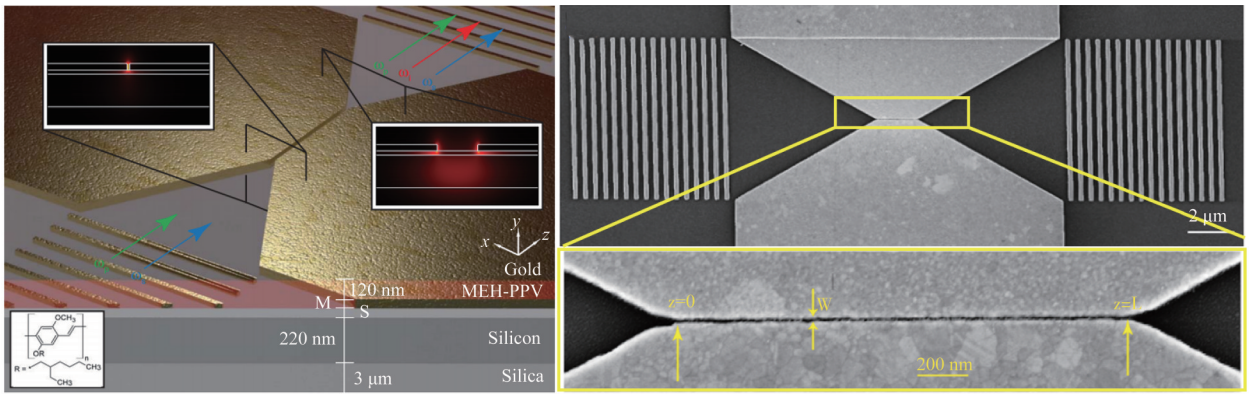
Fig. 3 Silicon-based polymer high-nonlinear waveguide of our team[53]

硅基-聚合物波导是近年非线性集成光子学的研究热点，研究者们不断探索具有更高克尔系数的有机材料、优化狭缝波导的结构参数，以进一步提升器件的非线性性能[54-60]。然而该类结构方案仍存在若干固有瓶颈：1)虽然狭缝结构将光场主要约束在低折射率聚合物区域，但当狭缝宽度大于50 nm时，仍有相当比例的倏逝场能量存在于硅波导中，降低了器件的非线性效率；2)为实现显著的光场增强，

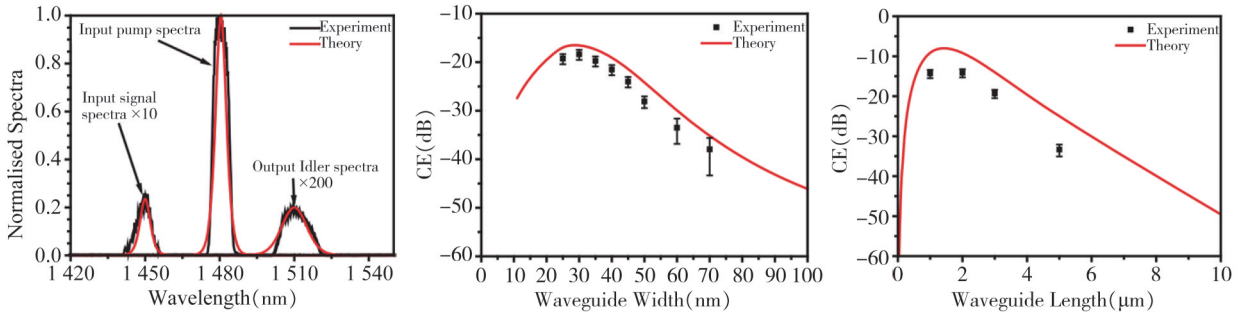
狭缝宽度需压缩至100 nm以下，而硅波导高度通常为220 nm，深宽比大于2∶1的狭缝结构使高粘度聚合物难以依靠毛细作用力完全填充，残留的空隙不仅引入额外的散射损耗，还使光场分布偏离设计预期，削弱了实际的非线性增强效果；3）狭缝侧壁的粗糙度由ICP刻蚀工艺决定，在光场被强局域化时显著增加了传输损耗，而侧壁光滑化处理，如四甲基氢氧化铵（Tetramethylammonium Hydroxide，TMAH）湿法腐蚀又受限于狭缝的几何约束，难以在保持窄线宽的同时有效实施。这些瓶颈导致硅基-聚合物狭缝波导的实际非线性性能往往低于理论预期，因此研究者们不断探索新的光场局域与非线性增强机制。

1.3　等离子体狭缝波导

为克服上述难题，Nielsen团队[61]提出了一种金属-介质-金属（MIM）构型的等离子体狭缝波导结构，是在硅波导衬底上设计的一种由金属层包覆的纳米聚焦锥形狭缝结构，狭缝宽度在尖端处可缩减至20 nm，这是当时乃至目前已知的狭缝波导宽度的极限值，如图4所示。利用金属界面上表面等离子体激元（SPPs）的极端场局域能力，光场能量被压缩至纳米尺度，在狭缝中产生极高的局域场增强，从而在纳米尺度的聚焦区域内实现了超高的光功率密度，与此同时，该结构将高非线性聚合物MEH-PPV填充于金属狭缝之中，利用其高克尔系数与等离子体激元极端场局域效应形成双重非线性增强，使有效非线性响应获得数量级提升。基于这一设计，该器件在四波混频实验中实现了−3.3 dB的超高FWM转换效率，器件的非线性系数达到了30 000 $W^{-1}\cdot m^{-1}$。尽管等离子体狭缝波导在全波段呈现正常色散，相干长度仅约2 μm，但其传播长度更短，在20 nm狭缝宽度下仅约2.5 μm，这意味着非线性频率转换在相位失配过程之前已因传播损耗而终止。换言之，损耗而非相位失配成为限制转换效率的主导因素，这使得器件无需复杂的色散工程设计即可在宽谱范围内保持相对平坦的转换响应。



（a）等离子体狭缝结构示意图及其电镜图



（b）四波混频测试数据及其转换效率与狭缝宽度、波导长度的关系

图4　MIM型等离子狭缝聚合物波导及其性能[61]

Fig. 4　The plasma slit polymer waveguide of MIM and the performance[61]

等离子狭缝波导也有其固有瓶颈，表面等离子体波在金属表面的传播损耗远高于介质波导，导致有效非线性作用长度被限制在数微米量级，这也是该类结构走向实用化的核心制约因素。MEH-PPV的损伤阈限制了可注入的最高光功率密度，而后续研究也表明在该类结构中聚合物的长期稳定性仍需

进一步验证。尽管如此，该技术仍极具开创性，它不仅从实验上验证了极端场局域结合高非线性材料这一异质集成策略在突破传统介质波导非线性瓶颈方面的可行性，更揭示了等离子体结构可在亚波长尺度上实现高效非线性频率转换的物理机制。

表1对比了上述几种狭缝波导方案的关键性能参数。可以看出，硅基狭缝波导与高非线性材料的异质集成是提升器件非线性系数的有效途径。然而，无论是聚合物填充还是等离子体结构，都存在各自的工艺或性能瓶颈。

表1 典型狭缝波导非线性器件性能对比

Tab. 1 Comparison of performance for typical slit waveguide nonlinear devices

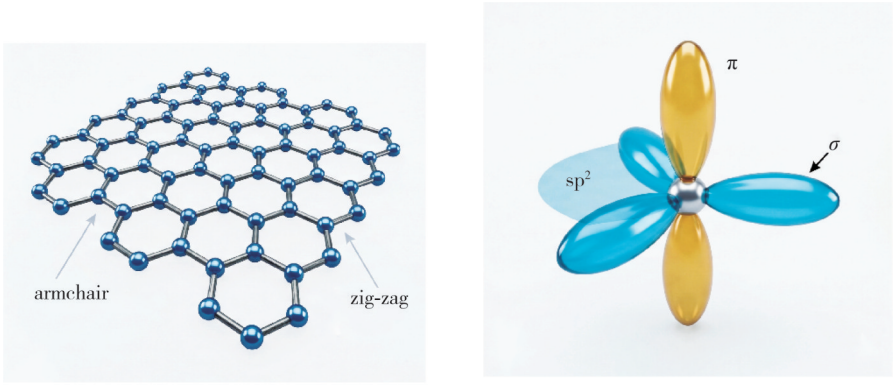
波导类型	狭缝宽度/nm	聚合物	非线性系数/(W^{-1}•m^{-1})	FWM转换效率/dB	主要局限
硅基狭缝波导[51]	100	DDMEBT	100	未报道	狭缝宽度太大，狭缝光场局域能力弱，与聚合物作用强度小
超窄硅基狭缝波导[53]	45	MEH-PPV	1 430	−27.5	狭缝宽度小于50nm，聚合物填充困难
硅基等离子体[61]	20	MEH-PPV	30 000	−13.3	传输光需激发金属等离子共振，增加额外损耗

2 硅基石墨烯高非线性器件

2.1 石墨烯的三阶非线性光学特性

石墨烯作为二维材料的典型代表，因其独特的能带结构、超高的载流子迁移率等特性而具有很多优异性能，也一直是超快光学领域的研究热点。经过十几年的发展，石墨烯的潜在应用仍被不断探索，尤其是2021年*Nature*报道的一种生长大面积、高质量、无折叠的单层石墨烯工艺[62]，进一步拓宽了石墨烯的应用领域。值得关注的是，石墨烯已经被证实具有极强的三阶非线性效应[63-64]，其克尔系数n_2可达10^{-11}～10^{-13} m^2/W[65-66]，相比硅基波导(10^{-18} m^2/W)高5～7个数量级，相比于非线性光纤(10^{-20} m^2/W)高7～9个数量级，使得石墨烯在增强器件的光学非线性效应方面拥有巨大的应用潜力[67-70]。

石墨烯由单层碳原子构成，其晶格结构呈规则的二维六角蜂窝状排列。每个碳原子位于六边形晶格的顶点位置，并通过sp^2杂化与周围3个碳原子形成σ键连接。如图5(b)所示，未参与杂化的p轨道电子在晶格平面上形成离域π电子体系，使载流子能够在其中高速运动，这也是石墨烯具有优异电学性能的重要原因。



(a) 单层石墨烯结构模型 (b) 石墨烯原子sp^2杂化轨道模型

图5 石墨烯原子结构

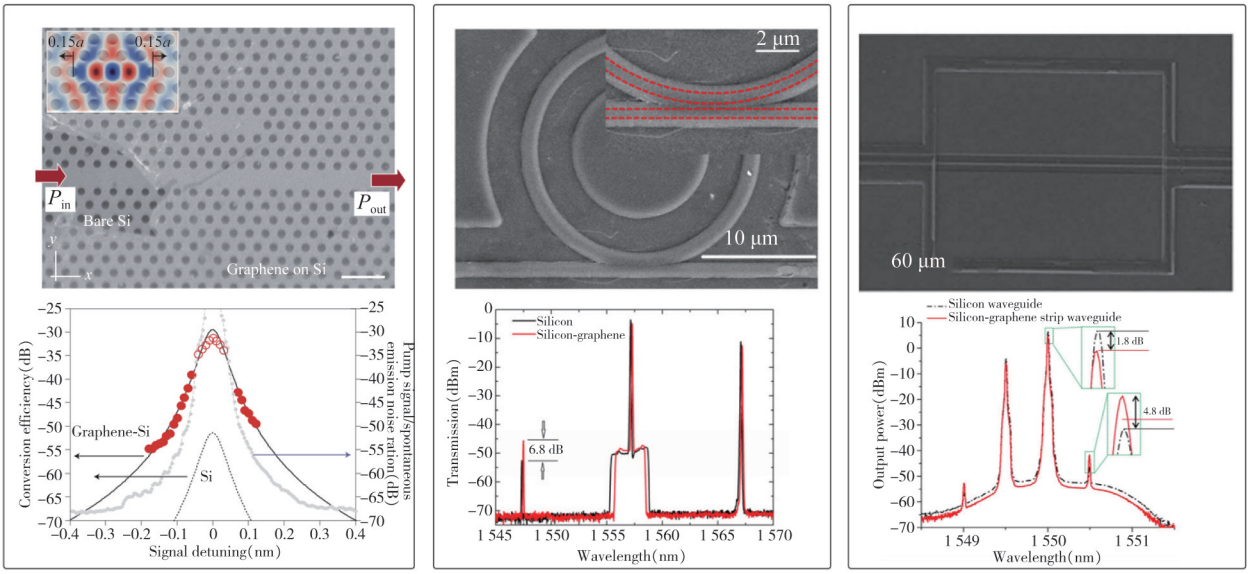
Fig. 5 Graphene atomic structure

石墨烯三阶非线性效应的物理根源可追溯至其线性色散关系下狄拉克费米子的独特量子共振跃迁通道。研究表明，石墨烯中不同量子共振跃迁通道之间的干涉效应使得减法型四波混频的强度高出加法型四波混频至少两个量级[69-70]。

2.2 石墨烯-硅基波导非线性集成器件

最早将石墨烯用于增强硅基光器件非线性的尝试始于Gu等[64]的工作。他们将单层石墨烯覆盖于硅基光子晶体腔表面，利用倏逝场与石墨烯的相互作用，在实验上观察到了显著的非线性增强效果，如图6(a)所示。与未覆盖石墨烯的光子晶体腔相比，四波混频转换效率提高了20 dB，对应的腔内循环能量仅为飞焦耳量级。该结果首次在实验层面证实了石墨烯在硅基非线性器件中的应用潜力。后续研究中，石墨烯的集成平台从光子晶体腔扩展至硅基微

环谐振腔[71]。研究人员在半径为10 μm的硅微环上覆盖单层石墨烯，同样观察到了四波混频效应的增强，最大转换效率提升约6.8 dB。基于实验数据建立的非线性传播模型表明，石墨烯覆盖后混合波导的等效克尔系数约为纯硅波导的3倍。与前两种谐振结构不同，上海交通大学苏翼凯团队采用了一种条形波导方案[72]，将石墨烯直接覆盖于硅条形波导之上，并通过窗口化二氧化硅层精确控制光与石墨烯的相互作用长度，如图6(c)所示。该方案不受谐振腔带宽限制，能够在更宽的光谱范围内实现非线性增强。实验测得的−3dB转换带宽为35 nm，理论预计可达140 nm。该工作还定量提取了石墨烯覆盖硅波导的非线性参数γ约为$1\times10^4\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^{-1}}$，相比同尺寸硅条形波导提升约100倍，首次在非谐振结构中给出了石墨烯增强硅波导非线性的定量实验依据。



(a) 光子晶体-石墨烯波导[64]　(b) 硅基微环-石墨烯波导[71]　(c) 硅基条形波导-石墨烯波导[72]

图 6　石墨烯-硅基波导非线性集成器件及四波混频测试结果

Fig. 6　Graphene-silicon waveguide nonlinear integrated device and four-wave mixing test results

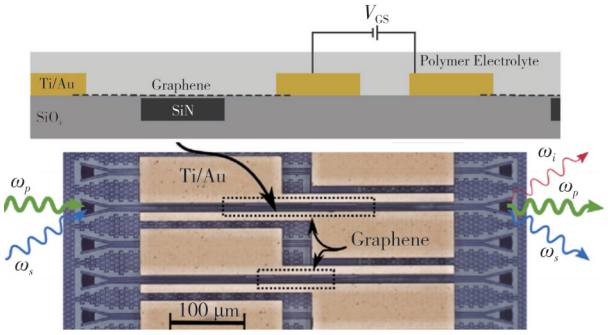
上述实验结果清楚表明，石墨烯具备较强的三阶非线性效应，且具有在硅基非线性光器件中实际应用的可能。然而，目前多数研究采用的均为未经调控的自然掺杂石墨烯，其费米能级受制备工艺、衬底掺杂及环境条件的影响而存在较大不确定性，而石墨烯三阶非线性效应强度与费米能级又存在一定关联，如果不对费米能级位置加以调控，器件的非线性效应将无法稳定控制。

2.3　石墨烯可调控非线性效应

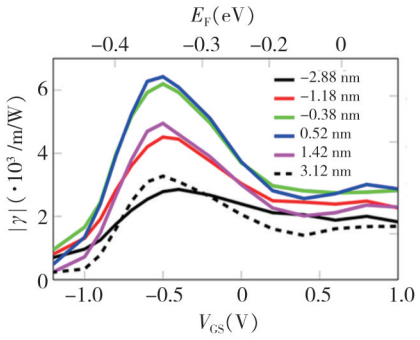
对于石墨烯三阶非线性效应与其费米能级的定量关系，近年来有了突破性的研究进展。2018年，复旦大学吴施伟课题组[69]和剑桥大学Soavi课题组[70]分别在*Nature Photonics*和*Nature Nanotechnology*上发表了相关研究成果，两项工作虽然采用不同的实验方案，但都证实了石墨烯的三阶非线性强度受到费米能级位置的显著影响，并通过实验给出了定量关系。这两项同期发表的工作相互印证，为后续通过电学手段调控石墨烯非线性提供了可靠的方法。吴施伟课题组采用离子凝胶在氧化硅基底上构建了类场效应晶体管结构，实验结果表明，加法型三阶非线性效应（加法型四波混频与三次谐波）和减法型三阶非线性效应（减法型四波混频与光学克尔效应）随费米能级的变化呈现相反的变化趋势。该工作中，离子凝胶与石墨烯界面间形成纳米级厚度的双电层，仅需小于3 V的偏压即可实现费米能级的有效调控。与此同时，Soavi课题组采用背栅场效应晶体管结构，重点研究了三次谐波效率对费米能级的依赖关系。尽管其实验所采用的门电压超过150 V，但三次谐波随费米能级的变化趋势与吴施伟课题组的观测结果基本吻合。两者工作手段不同而结论一致，共同确立了石墨烯费米能级作为调控其三阶非线性的有效控制参量，同时也凸显了离子凝胶在低电压调控方面的显著优势。

上述关于石墨烯三阶非线性与费米能级内在关联的认识，也在集成波导结构中得到了实验验证，

Alexander等[73]首次在集成波导结构中实现了石墨烯非线性的电控可调谐。该工作采用聚合物电解质门控的氮化硅波导，将单层石墨烯覆盖于波导之上，通过外加栅压连续调节费米能级。简并四波混频实验表明，波导的非线性系数γ随栅压从约2 800 $W^{-1}\cdot m^{-1}$调谐至6 400 $W^{-1}\cdot m^{-1}$，且在带间吸收边附近存在显著的共振增强，如图7所示。理论分析进一步揭示，采用能量相关的弛豫率模型可定性复现实验所观测到的双重共振行为，即非线性响应同时依赖于信号-泵浦失谐量和费米能级位置。



(a) 石墨烯波导结构及其电镜图



(b) 非线性系数随费米能级及电压变化

图7 电控可调的石墨烯非线性波导[73]

Fig. 7 Electrically controlled and tunable graphene nonlinear waveguide[73]

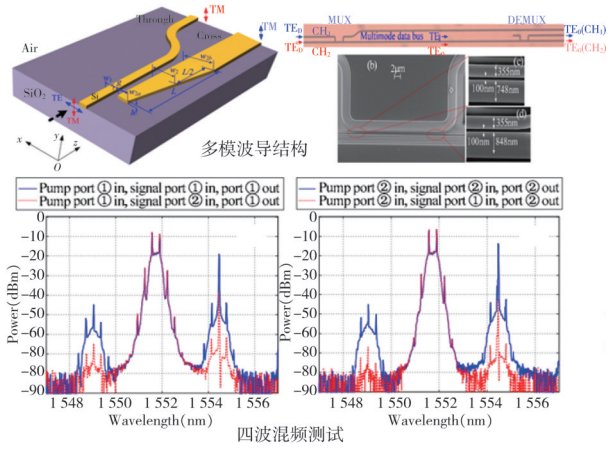
值得注意的是，费米能级的调控并非单纯提升非线性强度，而是在非线性贡献与光吸收损耗之间寻求最优平衡。根据泡利阻塞原理，当费米能级$|E_F|>\hbar\omega/2$时，带间跃迁被抑制，石墨烯对通信波段光变得透明；但当费米能级低于该阈值时，石墨烯会引入显著的吸收损耗，石墨烯与光波导集成结构的这种特性已被大量研究证实[74-85]。由于石墨烯的四波混频效率与费米能级大小呈反比趋势，而光吸收损耗与费米能级大小呈正比趋势，因此存在一个最优费米能级位置使净转换效率最大化。这种权衡构成了石墨烯集成非线性器件设计中需要综合考虑的核心因素。后续研究还需进一步探索不同费米能级下石墨烯非线性的物理机制，以及如何在低损耗与高强度之间实现最优平衡。

3 硅基多模非线性波导器件

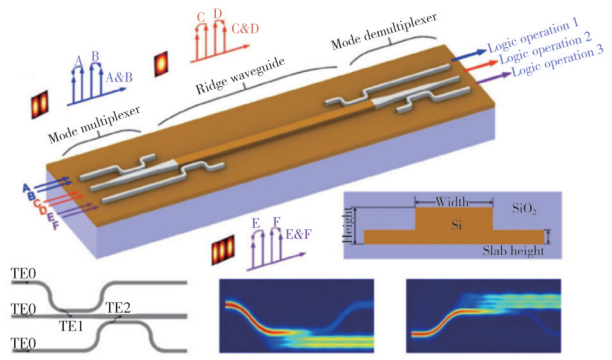
在多模硅基光波导中实现四波混频，是继石墨烯集成、狭缝波导等非线性增强方案之后，又一条提升片上光信息处理能力的重要技术路线。该方向的核心突破在于：不再仅仅追求单一模式非线性的“强度”，而是利用多模波导中不同空间模式作为新的自由度，实现模式选择性的波长转换、并行信号处理与信道容量扩展。多模波导最早在光纤中被研究[86-90]，随着微纳工艺的发展，硅基波导中的多模特性逐渐被广泛研究[91-97]。在多模硅基波导中实现模式选择性波长转换是该领域最早获得实验突破的方向之一，Ding等[98]于2014年在*Optics Express*上首次报道了基于硅基多模波导的模式选择性波长转换。该工作采用锥形定向耦合器(Tapered Directional Coupler，TDC)作为模式复用与解复用器件，将两路信号分别加载于多模波导的TE_0和TE_1模式上。通过设计波导宽度为750 nm，使两种模式在通信波段均具有较小的二阶色散，从而实现模内相位匹配，而不同模式之间的相位失配则有效抑制了模间四波混频串扰。实验在4 mm长的多模波导中实现了40 Gbit/s CSRZ信号的模式选择波长转换，模间串扰优于20 dB，模式内转换的功率代价分别为1.3 dB和2.8 dB，如图8(a)所示。Hu等[99]将波导结构从条形波导替换为脊波导，利用其更低的传输损耗和更弱的模间串扰，将并行逻辑运算的模式数量从2个扩展至3个。该脊波导的尺寸参数分别为：脊厚220 nm、板高70 nm、波导宽度1 412 nm，支持TE_0、TE_1和TE_2三种空间模式，各模式损耗分别为0.6、0.75和0.9 dB/cm，转换效率均优于−20 dB。器件输入和输出端各集成两个非对称定向耦合器，实现TE_0与TE_1、TE_0与TE_2之间的模式转换，如图8(b)所示。在该配置下，实验成功实现了3×40 Gbit/s的并行逻辑与运算，各模式闲频光眼图清晰张开。相较于单模器件实现同等数据吞吐量需3倍芯片面积，多模脊波导方案在面积效率上具有显著优势。

利用多模硅波导中的模内四波混频效应可实现片上多通道并行光逻辑运算。该方案通过在单个多

模波导的多个空间模式上同时发生四波混频，将来自不同端口的信号光在各自模式内转换为携带逻辑运算结果的闲频光，利用两个模式的并行传输可同时完成多路光信号的逻辑与、或、异或等运算[100-106]。该方案无需增加额外波导或器件面积，仅依靠多模波导本身即可实现信号处理容量的倍增，为未来高密度集成光计算芯片提供了重要的技术储备。



(a) Ding等设计的多模波导及测试结果[98]

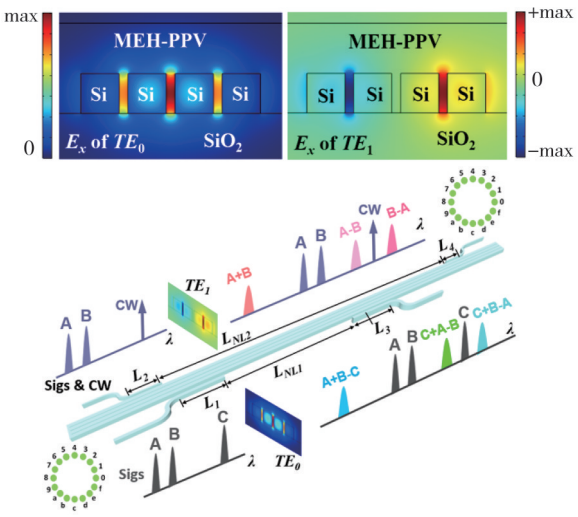


(b) Hu等设计的多模波导及仿真结果[99]

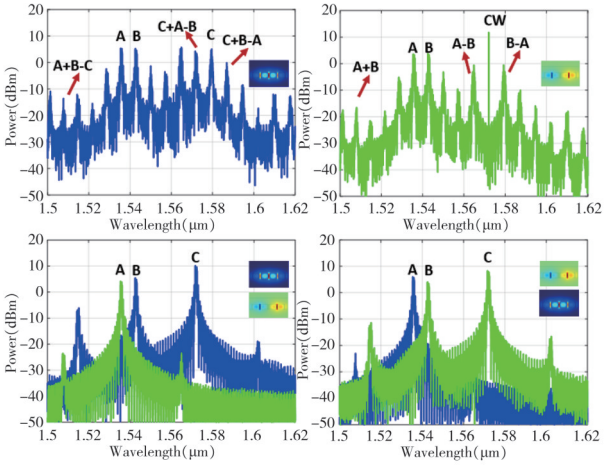
图 8　硅基多模非线性波导器件

Fig. 8　Silicon-based multimode nonlinear waveguide devices

2020 年，本团队将狭缝波导的高光场局域能力引入多模硅基平台，提出了一种兼具狭缝结构与多模并存的复合波导结构，该波导由 4 个平行的硅波导构成，波导间隙（50 nm）中填充了高非线性聚合物 MEH-PPV，如图 9（a）所示。与传统多模硅波导中不同模式光场分布在整个波导截面不同，在该结构中 TE_0 和 TE_1 模式均被同时限制在纳米尺度的狭缝区域中传输，有效模场面积大幅缩减，从而在维持多模传输能力的前提下显著提高了光功率密度。基于该结构，TE_0 和 TE_1 模式的非线性系数分别达到 7078 $W^{-1}\cdot m^{-1}$ 和 5858 $W^{-1}\cdot m^{-1}$，较普通硅条形波导提升约两个数量级。通过色散工程优化狭缝宽度和波导宽度等结构参数，该器件在两种模式内部均满足相位匹配条件以实现高效模内四波混频，而模式间的相位失配则有效抑制了串扰。在此基础上，该工作数值演示了 1.28 Tbit/s 的多模十六进制加减光逻辑运算，160 Gbaud 的 16PSK 信号分别加载于 TE_0 模式（信号 A、B、C）和 TE_1 模式（信号 A、B 及一路连续光），通过非简并四波混频在两个模式的不同闲频光上同时实现了 A+B-C、A+C-B、B+C-A、A+B、A-B、B-A 共六种逻辑运算，对应的误差矢量幅度（EVM）均小于 5.8%。该工作首次将狭缝波导的光场局域优势与多模波导的并行处理能力相结合，验证了有机-硅混合集成方案在高速多模光逻辑运算中的可行性，为后续进一步引入石墨烯等具有更高非线性系数的二维材料提供了重要的结构借鉴。



(a) 多模十六进制加减光逻辑运算模型

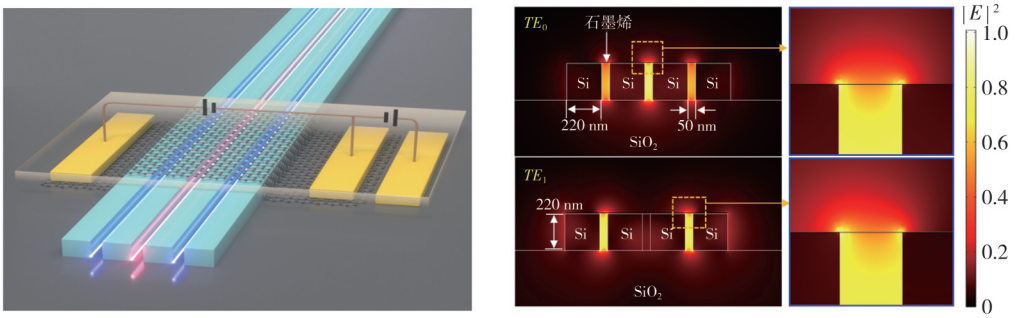


(b) 多模光逻辑运算光谱图及模式间串扰测试

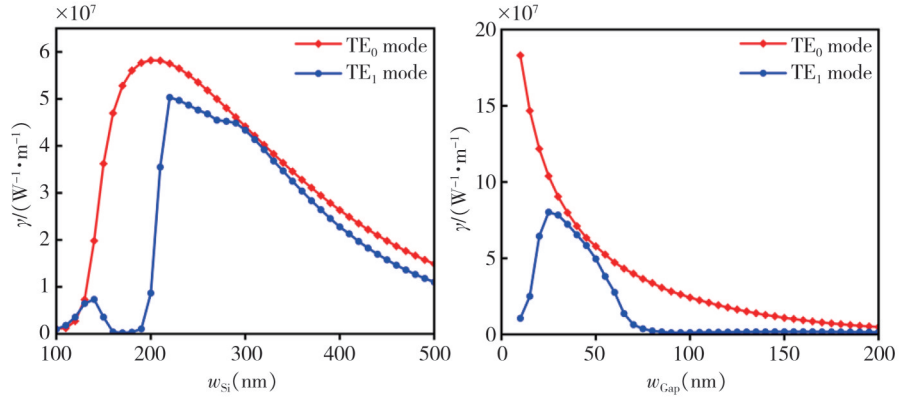
图 9　本团队设计的狭缝-多模复合波导结构[107]

Fig. 9　The slot-multimode hybrid waveguide structure designed by our team[107]

上述狭缝-多模复合波导方案虽已验证其可行性，但受限于有机聚合物的克尔系数，非线性强度的进一步提升仍面临瓶颈。为此，本团队将目光投向具有更高克尔系数的二维材料石墨烯，并于2026年提出了一种石墨烯集成硅基多模狭缝波导，该结构在几何构型上与前述有机-硅方案类似，由4个平行的硅基条形波导构成50 nm的狭缝，不同的是将填充于狭缝中的有机聚合物替换为平铺于波导上方的单层石墨烯，利用狭缝中极大增强的倏逝场与石墨烯发生非线性相互作用，如图10(a)所示。理论计算表明，得益于石墨烯超强的非线性以及狭缝对光场的极端局域化，该结构的非线性系数γ_{eff}在TE_0和TE_1模式下均达到$10^8\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^{-1}}$量级，较前述方案[107](约$7\,000\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^{-1}}$)提升了约4个数量级，较普通硅条形波导提升超过6个数量级，如图10(b)所示。这些结果表明，石墨烯与多模狭缝波导的结合不仅在非线性系数上实现了数量级的跨越，更在保持多模并行处理能力的同时为低功耗、高速度光信号处理提供了可行的材料与结构基础，显示出该方案在下一代片上光逻辑运算与信息处理芯片中的应用潜力。



(a) 多模狭缝-石墨烯波导结构及其波导截面模场分布



(b) TE_0和TE_1模式非线性系数随狭缝宽度及波导宽度的变化

图10 多模狭缝-石墨烯波导器件[108]

Fig. 10 Multimode slot silicon graphene waveguide device[108]

4 讨论与展望

4.1 当前研究进展总结

硅基光波导非线性增强及其光逻辑运算的研究已形成三条各具特色的技术路径。狭缝波导通过将光场局域在纳米尺度低折射率区域，实现了光功率密度的数量级提升，从硅基-聚合物复合方案($\gamma\approx100\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^{-1}}$)到等离子体狭缝($\gamma\approx3\times10^4\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^{-1}}$)，狭缝结构已成为非线性增强的基础性平台。石墨烯凭借其超高的克尔系数将光子晶体腔中转换效率提升20 dB，而在氮化硅波导平台上，非线性参数$|\gamma|$已可通过电压调节从$2\,800\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^{-1}}$变化至$6\,400\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^{-1}}$，表明石墨烯已具备作为电控非线性介质的可行性。多模波导在提升系统容量方面也展现出价值，先后实现了从40 Gbit/s模式选择波长转换到102.6 Gbit/s OFDM-QPSK信号处理，以及3×40 Gbit/s并行逻辑运算，证明了其在单波长通信容量扩展方面的作用。在此基础之上，多模狭缝波导的结构将上述思路进行了整合。已有研究提出的有机-硅多模狭缝波导中，TE_0和TE_1模式的非线性系数分别达到$7\,078$和$5\,858\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^{-1}}$，并完成了1.28 Tbit/s的多模十六进制光加减运算的数值验证；若以石墨烯替代有机材料，理论非线性系数可进一步提升至5×

10^8 $W^{-1}\cdot m^{-1}$量级，较有机方案高出约4个数量级。上述进展表明，高非线性硅基波导早期阶段以单一硅材料、单模传输为主要特征，随后高非线性聚合物与石墨烯等材料的引入改善了材料层面的非线性响应，多模波导的采用则增加了空间并行处理的能力。这些不同方向的研究积累，使硅基非线性器件的综合性能不断接近实际应用需求，也为片上光逻辑运算的实现提供了技术基础。

4.2　面临的挑战

尽管取得了上述显著进展，硅基石墨烯多模狭缝波导及其光逻辑运算相关方向仍面临若干尚待突破的问题。从制备工艺来看，狭缝宽度低于50 nm时，其形貌控制有赖于电子束光刻与ICP刻蚀参数的精确配合。侧壁粗糙度导致的散射损耗目前仍难以完全抑制，直接影响了器件的整体性能。与此同时，石墨烯与硅波导之间界面质量的可控性尚未得到根本解决。目前普遍采用的CVD生长及湿法转移流程，容易在石墨烯薄膜中引入褶皱、裂纹或表面吸附物。这些缺陷不仅造成额外的光损耗，还会使费米能级在空间上分布不均，进而降低非线性响应的效率。此外，金属电极制备环节可能对石墨烯造成的损伤，以及离子凝胶类材料在长期工作条件下的稳定性，也有待进一步考察。在非线性调控方面，尽管已有理论模型描述了费米能级与三阶非线性系数之间的关系，实验测量结果与理论预测之间仍存在约一个量级的偏差。造成这种差异的原因较为复杂，例如：石墨烯掺杂浓度的不均匀性、弛豫率随能量的变化规律尚未被精确纳入模型，以及实际器件中模场分布与理想化仿真之间的差异等。模式数量的增加也带来了新的困难。多模信号的复用与解复用、不同模式间串扰的抑制，以及与CMOS电路的混合集成，均需持续投入研究。随着模式阶数和数量的提升，复用/解复用结构的设计复杂度、色散管理的难度以及整体损耗的控制难度都将显著增加。上述问题能否得到有效解决，将在很大程度上决定硅基非线性波导器件能否从实验室走向实际应用，也是该领域下一阶段研究需要重点攻克的方向。

4.3　未来趋势

在AI算力需求爆发式增长与传统电子集成技术逼近物理极限的双重背景下，硅基光互连与光电集成技术的研究已日趋成熟。基于硅基光波导的调制器、探测器等核心光模块已在数据中心短距互连中实现商用部署，硅光收发器件的生产规模与集成度持续提升，标志着硅基光子学正从实验室研究走向产业应用[109-115]。然而，面向下一代AI集群和高性能计算对带宽密度、能耗效率和低延迟互连的苛刻要求，现有商用光模块和片上光互连方案在信号处理能力上仍高度依赖外围电路，尚无法在光域中完成高效的逻辑运算与信息处理。要充分发挥光互连的带宽潜力，亟需在硅基平台上实现高非线性、低功耗、多通道并行的全光信号处理能力。正如晶体管是电子电路中最基本的主动元件，非线性波导在光域中扮演着类似的核心角色，它是实现全光信号放大、波长转换和逻辑运算的物理基础，因此，如何提高硅基波导的非线性强度，已成为该领域亟待解决的核心问题。

从当前的技术积累出发，以下几个方向值得重点关注。首先是材料体系，纯硅的克尔系数有限，且通信波段存在双光子吸收效应，这些固有缺陷推动了多种材料体系的引入。石墨烯以其超高的三阶非线性成为代表性选择，SiN、AlGaAs、Ta_2O_5等平台也在各自擅长的波段展现出独特优势。未来的趋势并非寻找一种“万能材料”，而是根据应用场景选择或组合不同材料，例如在通信波段主推石墨烯-硅异质集成，在可见光或中红外波段选用SiN或AlGaAs。多材料的单片或混合集成，将是解决单一材料性能天花板的主要路径。其次是制造工艺，硅光器件的优势在于能够利用成熟的CMOS工艺进行规模化生产，但非线性波导器件尚未真正进入这一阶段，石墨烯转移、超窄狭缝刻蚀、侧壁光滑化处理等工艺步骤在单次实验室演示中可行，但在晶圆级量产中的均匀性、重复性和良率仍是未知数。未来几年，非线性波导器件的工艺开发将更倾向采用与现有硅光工艺兼容性更高的设计方案。最后是系统集成方面，光逻辑运算器件最终需要与光源、调制器、探测器等周边元件集成在同一芯片上才能构成完整系统，当前大多数研究集中在单一非线性器件本身，对系统级集成考虑不足，未来将逐渐出现将高非线性波导与激光器、光电探测器、电子控制电路等元件集成在同一芯片上的尝试，最初可能是混合集成，比如将不同材料分别制备后键合，逐步过渡到单片集成，在同一制备平台完成全部

功能。综合上述技术发展才可能最终让非线性波导器件真正进入实用化的光互连与光计算系统，为算力驱动的AI时代提供坚实的硬件基础。

4.4 结 论

硅基光波导非线性增强及其光逻辑运算研究历经近二十年的发展，已从单一材料、单模传输的初级阶段演进至异质集成与多模并行的新阶段。狭缝波导提供了光场极端局域化的有效途径，石墨烯赋予了超高且可调的非线性响应，多模波导增加了并行处理的手段，三者各自解决了不同层面的问题，汇聚成为当前提升器件非线性性能的几条主要技术路线。尽管在工艺制备、非线性调控和系统集成方面仍面临诸多挑战，但随着微纳加工技术的持续推进、二维材料与硅光集成工艺的不断成熟以及光电协同设计方法的日趋完善，非线性光子集成器件的综合性能有望得到系统性提升，为后摩尔时代的信息处理技术发展提供重要的硬件基础。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] Wright A. Worldwide IDC global DataSphere forecast update, 2025—2029: regional analysis: US53363625 [R/OL]. 2025-05-22. https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=US53383425&pageType.

[2] Lipson M. The revolution of silicon photonics [J]. Nature Materials, 2022, 21(9): 974-975.

[3] Hu F C, Yu F X, Liu X Y, et al. 400-Gbps/λ ultrafast silicon microring modulator for scalable optical compute interconnects [J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20(13): e02840.

[4] Sun A L, Xing S Z, Deng X Y, et al. Edge-guided inverse design of digital metamaterial-based mode multiplexers for high-capacity multi-dimensional optical interconnect [J]. Nature Communications, 2025, 16: 2372.

[5] Zhao S A, Zhao X Y, Kuang H B, et al. High modulation efficiency micro-ring modulator with low driving voltage for high speed optical interconnection [J]. Optics Express, 2025, 33(9): 19442-19452.

[6] Zhang Y H, Shu H W, Guo Y J, et al. Integrated photonics enabling ultra-wideband fibre - wireless communication[J]. Nature, 2026, 651(8105): 348-355.

[7] Zhou X T, Yi D, Chan D W U, et al. Silicon photonics for high-speed communications and photonic signal processing[J]. npj Nanophotonics, 2024, 1: 27.

[8] Cai J C, Kotz A, Larocque H, et al. Heterogeneously integrated lithium tantalate-on-silicon nitride modulators for high-speed communications [J]. Nature Communications, 2026, 17: 3314.

[9] McMahon P L. The physics of optical computing [J]. Nature Reviews Physics, 2023, 5(12): 717-734.

[10] Kazanskiy N L, Butt M A, Khonina S N. Optical computing: status and perspectives [J]. Nanomaterials, 2022, 12(13): 2171.

[11] Ning S P, Zhu H Q, Feng C H, et al. Photonic-electronic integrated circuits for high-performance computing and AI accelerators [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(22): 7834-7859.

[12] Qin J, Jiang S B, Wang Z S, et al. Metasurface micro/nano-optical sensors: principles and applications [J]. ACS Nano, 2022, 16(8): 11598-11618.

[13] Poon J K S, Govdeli A, Sharma A, et al. Silicon photonics for the visible and near-infrared spectrum [J]. Advances in Optics and Photonics, 2024, 16(1): 1.

[14] Kumar A, Gupta M, Pitchappa P, et al. Topological sensor on a silicon chip [J]. Applied Physics Letters, 2022, 121: 011101.

[15] Willner A E, Khaleghi S, Chitgarha M R, et al. All-optical signal processing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4): 660-680.

[16] Xu J, Dong W C, Huang Q Z, et al. Progress in silicon-based reconfigurable and programmable all-optical signal processing chips [J]. Frontiers of Optoelectronics, 2025, 18: 10.

[17] Hu F Z, Ma X G, Chen X. All-optical synapses enabled by photochromic materials for high-accuracy optical signal recognition [J]. ACS Photonics, 2025, 12(5): 2637-2646.

[18] Ge Y Q, Wang W K, Wang M, et al. All-optical logic processing unit using Kerr nonlinearity of MXene [J]. Nature Communications, 2026, 17: 4078.

[19] Gu Z J, Shi Y, Zhu Z M, et al. All-integrated multidimensional optical sensing with a photonic neuromorphic processor[J]. Science Advances, 2025, 11(22): eadu7277.

[20] Marin-Palomo P, Abdollahi S, Ladouce M, et al. Agile and broadband all-optical wavelength conversion with multi-wavelength lasers [J]. Optica, 2026, 13(4): 729.

[21] Zhao P, He Z L, Shekhawat V, et al. 100-Gbps per-channel all-optical wavelength conversion without pre-amplifiers based on an integrated nanophotonic platform [J]. Nanophotonics, 2023, 12(17): 3427-3434.

[22] Agarwal R, Bhatia R. All-optical modulation format conversion between 16-PSK and 8-PSK in elastic optical network [J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(2): 160.

[23] Yan Z W, Zheng S, Yi Q Y, et al. Ultra-broadband continuous-wave mid-infrared wavelength conversion in germanium-on-silicon waveguides[J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20(3): e01350.

[24] Lei L, Dong J J, Zou B R, et al. Expanded all-optical programmable logic array based on multi-input/output canonical logic units [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9959.

[25] Lu G W, Sakamoto T, Kawanishi T. Wavelength conversion of optical 64QAM through FWM in HNLF and its performance optimization by constellation monitoring[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 15.

[26] Qiu J F, Sun K, Rochette M, et al. Reconfigurable all-optical multilogic gate (xor, and, and or) based on cross-phase modulation in a highly nonlinear fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(16): 1199-1201.

[27] Xia K, Yang Z, Zhao P P, et al. Supercontinuum generation in As_2S_3 chalcogenide waveguide pumped by all-fiber structured dual-femtosecond solitons [J]. Optics Express, 2023, 31(18): 29440-29451.

[28] Laudert B, Eilenberger F, Neshev D. Linear and third-order nonlinear optical response of hafnium disulfide[J]. Advanced Optical Materials, 2026, 14(16): e71164.

[29] Vyas K, Espinosa D H G, Hutama D, et al. Group III-V semiconductors as promising nonlinear integrated photonic platforms [J]. Advances in Physics: X, 2022, 7: 2097020.

[30] Xie W Q, Xiang C, Chang L, et al. Silicon-integrated nonlinear III-V photonics [J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 535.

[31] Hu J R, Yuan H, Akin J, et al. Efficient bidirectional quantum frequency conversion between telecom and visible bands using adaptively phase-matched III-V nanophotonic waveguides [J]. Nature Communications, 2026, 17: 4995.

[32] Wang G, Yakar O, Ji X R, et al. Integrated tunable green light source on silicon nitride[J]. Light: Science & Applications, 2026, 15: 132.

[33] Zabelich B, Nitiss E, Stroganov A, et al. Linear electro-optic effect in silicon nitride waveguides enabled by electric-field poling [J]. ACS Photonics, 2022, 9(10): 3374-3383.

[34] Jaber N, Madaras S, Starbuck A, et al. Non-resonant Bragg scattering four-wave mixing at near-visible wavelengths in low-confinement silicon nitride waveguides[J]. Optics Letters, 2024, 49(11): 3146.

[35] Vitali V, Bucio T D, Liu H, et al. Nonlinear multimode photonics on-chip[J]. Nanophotonics, 2025, 14(15): 2507-2548.

[36] Fu W J, Shi X D, Mohanraj S S, et al. Passive all-optical nonlinear neuron activation *via* PPLN nanophotonic waveguides[J]. eLight, 2026, 6(1): 9.

[37] Yanagimoto R, Ash B A, Sohoni M M, et al. Programmable on-chip nonlinear photonics [J]. Nature, 2026, 649(8096): 330-337.

[38] Gaeta A L, Lipson M, Kippenberg T J. Photonic-chip-based frequency combs [J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 158-169.

[39] Dinu M, Quochi F, Garcia H. Third-order nonlinearities in silicon at telecom wavelengths [J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(18): 2954-2956.

[40] Kim K S, Reed W A, Quoi K W, et al. Measurement of the nonlinear index of silica-core and dispersion-shifted fibers[J]. Optics Letters, 1994, 19(4): 257.

[41] Luan C, Kong D, Liu Y, et al. High-efficiency graphene-silicon slot-waveguide microring modulator at 1.5 and 2 μm wavelength bands[J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20(19): e71349.

[42] Zhu J B, Yu Q L, Jin Y L, et al. Compact and low-loss on-chip silicon crossing based on subwavelength grating slot waveguides[J]. Optics Express, 2025, 33(3): 4902.

[43] Zhou Z A, Chen H T, Zhou S Y, et al. High-performance all-optical modulator based on graphene-loaded ultrathin silicon slot waveguides[J]. Advanced Photonics Research, 2026, 7(4): e70201.

[44] Mu R Q, Xu F, Zheng F X, et al. All-in-one integrated polymer waveguide with phase-shifted Bragg grating for enhanced fluorescence detection [J]. Applied Optics, 2025, 64(31): 9512.

[45] Peng C, Yang C J, Zhao H, et al. Optical waveguide refractive index sensor for biochemical sensing [J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3829.

[46] Li H, Tang Y Q, Chen Q A, et al. Compact thin-film lithium niobate modulators using slotted coplanar waveguide electrode suitable for high-volume fabrication

[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(15): 154001.

[47] Zhang Y Q, Xue H Y, Yang P, et al. Suppression of slot-line mode in thin-film lithium niobate modulators with an integrated frequency-domain equalizer [J]. Optics Express, 2026, 34(10): 18582-18593.

[48] Lim J, Shim J, Geum D M, et al. Experimental demonstration of germanium-on-silicon slot waveguides at mid-infrared wavelength[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 5828709.

[49] Alaloul M, Al-Ani A M, As'Ham K, et al. Mid-wave infrared graphene photodetectors with high responsivity for on-chip gas sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(3): 2040-2046.

[50] Kovalchuk O, Gong S, Moon H, et al. Graphene-advanced functional devices for integrated photonic platforms[J]. npj Nanophotonics, 2025, 2: 31.

[51] Koos C, Vorreau P, Vallaitis T, et al. All-optical high-speed signal processing with silicon - organic hybrid slot waveguides[J]. Nature Photonics, 2009, 3(4): 216-219.

[52] Hong J X, Rokumyo K, Mao J W, et al. Efficient four-wave mixing wavelength conversion in a hybrid silicon slot and polymer microring resonator [J]. Optics Express, 2022, 30(25): 45499.

[53] Wang Y H, He S, Gao X Y, et al. Enhanced optical nonlinearity in a silicon - organic hybrid slot waveguide for all-optical signal processing [J]. Photonics Research, 2022, 10(1): 50.

[54] Steglich P, Mai C, Villringer C, et al. Silicon-organic hybrid photonics: an overview of recent advances, electro-optical effects and CMOS integration concepts [J]. Journal of Physics: Photonics, 2021, 3(2): 022009.

[55] Steglich P, Mai C, Mai A. Silicon-organic hybrid photonic devices in a photonic integrated circuit technology [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2019, 8(11): Q217-Q221.

[56] Heni W, Kutuvantavida Y, Haffner C, et al. Silicon - organic and plasmonic - organic hybrid photonics[J]. ACS Photonics, 2017, 4(7): 1576-1590.

[57] Leuthold J, Freude W, Brosi J M, et al. Silicon organic hybrid technology: a platform for practical nonlinear optics[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(7): 1304-1316.

[58] Leuthold J, Koos C, Freude W, et al. Silicon-organic hybrid electro-optical devices [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 3401413.

[59] Zhang X Y, Hosseini A, Lin X H, et al. Polymer-based hybrid-integrated photonic devices for silicon on-chip modulation and board-level optical interconnects [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 3401115.

[60] Baehr-Jones T W, Hochberg M J. Polymer silicon hybrid systems: a platform for practical nonlinear optics [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2008, 112(21): 8085-8090.

[61] Nielsen M P, Shi X, Dichtl P, et al. Giant nonlinear response at a plasmonic nanofocus drives efficient four-wave mixing[J]. Science, 2017, 358(6367): 1179-1181.

[62] Wang M H, Huang M, Luo D, et al. Single-crystal, large-area, fold-free monolayer graphene[J]. Nature, 2021, 596(7873): 519-524.

[63] Hendry E, Hale P J, Moger J, et al. Coherent nonlinear optical response of graphene[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(9): 097401.

[64] Gu T, Petrone N, McMillan J F, et al. Regenerative oscillation and four-wave mixing in graphene optoelectronics[J]. Nature Photonics, 2012, 6(8): 554-559.

[65] Zhang H, Virally S, Bao Q L, et al. Z-scan measurement of the nonlinear refractive index of graphene[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1856.

[66] Vermeulen N, Castelló-Lurbe D, Cheng J L, et al. Negative Kerr nonlinearity of graphene as seen via chirped-pulse-pumped self-phase modulation [J]. Physical Review Applied, 2016, 6(4): 044006.

[67] Dremetsika E, Dlubak B, Gorza S P, et al. Measuring the nonlinear refractive index of graphene using the optical Kerr effect method[J]. Optics Letters, 2016, 41(14): 3281.

[68] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics [J]. Nature Photonics, 2010, 4(9): 611-622.

[69] Jiang T, Huang D, Cheng J L, et al. Gate-tunable third-order nonlinear optical response of massless Dirac fermions in graphene[J]. Nature Photonics, 2018, 12(7): 430-436.

[70] Soavi G, Wang G, Rostami H, et al. Broadband, electrically tunable third-harmonic generation in graphene [J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(7): 583-588.

[71] Ji M X, Cai H, Deng L K, et al. Enhanced parametric frequency conversion in a compact silicon-graphene microring resonator [J]. Optics Express, 2015, 23

(14)：18679-18685.

[72] Yang Y X, Xu Z Z, Jiang X H, et al. High-efficiency and broadband four-wave mixing in a silicon-graphene strip waveguide with a windowed silica top layer[J]. Photonics Research, 2018, 6(10): 965.

[73] Alexander K, Savostianova N A, Mikhailov S A, et al. Electrically tunable optical nonlinearities in graphene-covered SiN waveguides characterized by four-wave mixing[J]. ACS Photonics, 2017, 4(12): 3039-3044.

[74] Zhang M , Han N N, Wang J, et al. Strong second harmonic generation from bilayer graphene with symmetry breaking by redox-governed charge doping[J]. Nano Letters, 2022, 22(11): 4287-4293.

[75] Na S R, Suk J W, Ruoff R S, et al. Ultra long-range interactions between large area graphene and silicon [J]. ACS Nano, 2014, 8(11): 11234-11242.

[76] Wang W H, Yan Z Z, Zhang J F, et al. High-performance position-sensitive detector based on graphene - silicon heterojunction[J]. Optica, 2018, 5(1): 27.

[77] Riazimehr S, Kataria S, Bornemann R, et al. High photocurrent in gated graphene-silicon hybrid photodiodes[J]. ACS Photonics, 2017, 4(6): 1506-1514.

[78] Cai Z Q, Zhang X Z, Karnik T S, et al. Electrically tuning quasi-bound states in the continuum with hybrid graphene-silicon metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(8): 2402344.

[79] Dhandapani G, N P, U A K, et al. Design and development of graphene-based C-shaped silicon-MgF_2-silicon materials surface plasmon resonance biosensor for cervical cancer detection[J]. Plasmonics, 2025, 20(8): 5835-5845.

[80] Kovalchuk O, Gong S, Moon H, et al. Graphene-advanced functional devices for integrated photonic platforms[J]. npj Nanophotonics, 2025, 2: 31.

[81] Meng Q, Fu J S, Tian Z A, et al. Graphene-based athermal silicon photonic optical transmitter operating beyond 100 Gbps[J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20(10): e02199.

[82] Hashemnezhad H, Noori M. High responsivity zero-biased Mid-IR graphene photodetector based on chalcogenide glass waveguide[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181: 111852.

[83] Zhao Z H, Li X F, Liu M Y, et al. All-optical one-to-six wavelength multicasting of quadrature phase-shift keying signal by phase-sensitive amplification in graphene oxide hybrid waveguide[J]. Optical Engineering, 2025, 64(7): 1-10.

[84] Kanwal S, Abdulsada A M, Rezaei M H. High modulation depth, ultra-compact, and tunable electro-optical modulator based on dielectric-loaded graphene-plasmonic waveguides[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 193: 109059.

[85] Xu Y J, Zhang C R, Huang Z Y, et al. Electrically tunable nonlinear transmission characteristics of graphene hybrid plasmonic waveguides for neuromorphic activation functions[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 192: 113929.

[86] Tomlinson W J. Wavelength multiplexing in multimode optical fibers[J]. Applied Optics, 1977, 16(8): 2180. [87] Rahmani B, Oguz I, Tegin U, et al. Learning to image and compute with multimode optical fibers[J]. Nanophotonics, 2022, 11(6): 1071-1082.

[87] Rahmani B, Oguz I, Tegin U, et al. Learning to image and compute with multimode optical fibers[J]. Nanophotonics, 2022, 11(6): 1071-1082.

[88] Hammer H C, Uppu R. Effect of core geometry on frequency correlations and channel capacity of a multimode optical fiber[J]. Advanced Photonics Research, 2025, 6(6): 2400156.

[89] Rodríguez-Rodríguez W E, Rodríguez-Rodríguez A J, Juárez-Saldivar A, et al. Low-cost optical fiber multimode interference biosensor based on a glucose sensitive Glucose-Oxidase enzyme thin-film[J]. Sensors and Actuators Reports, 2025, 9: 100267.

[90] Htay Z, Barbosa F A, Ferreira F M. Analysis of crosstalk drift and optimization of spatial light modulator based mode-selective multiplexers for multimode fibers[J]. Optics Express, 2025, 33(2): 2896.

[91] Hu G L, Qin Y, Xu H N, et al. High-speed multimode fiber imaging using binary-modulated silicon photonics optical phased array[J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(13): 2402206.

[92] Mojaver K R, Safaee S M R, Morrison S S, et al. Recent advancements in mode division multiplexing for communication and computation in silicon photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(22): 7860-7870.

[93] Zhou X T, Yi D, Chan D W U, et al. Silicon photonics for high-speed communications and photonic signal processing[J]. npj Nanophotonics, 2024, 1: 27.

[94] Hu G L, Zhong K Y, Qin Y, et al. Silicon photonic integrated circuit for high-resolution multimode fiber imaging system[J]. APL Photonics, 2023, 8(4): 046104.

[95] Chowdhury A Z. Performance study of silica-on-silicon based multimode interference (MMI) optical coupler[J]. Photonic Sensors, 2014, 4(1): 34-42.

[96] Xiang C, Jin W, Huang D N, et al. High-performance silicon photonics using heterogeneous integration[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2022, 28(3: Hybrid Integration for Silicon Photonics): 8200515.

[97] Vitali V, Bucio T D, Liu H, et al. Nonlinear multimode photonics on-chip[J]. Nanophotonics, 2025, 14(15): 2507-2548.

[98] Ding Y H, Xu J, Ou H Y, et al. Mode-selective wavelength conversion based on four-wave mixing in a multimode silicon waveguide [J]. Optics Express, 2014, 22(1): 127.

[99] Hu Y H, Yang Z H, Chen N, et al. 3 × 40 Gbit/s all-optical logic operation based on low-loss triple-mode silicon waveguide[J]. Micromachines, 2022, 13(1): 90.

[100] Qiu Y, Li X, Luo M, et al. Mode-selective wavelength conversion of OFDM-QPSK signals in a multimode silicon waveguide[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 4493.

[101] Xiong J B, Yu Y, Yang W L, et al. Crosstalk suppressed high efficient mode-selective four-wave mixing through tailoring waveguide geometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 6600408.

[102] Ma M, Chen L R. Harnessing mode-selective nonlinear optics for on-chip multi-channel all-optical signal processing[J]. APL Photonics, 2016, 1(8): 086104.

[103] Signorini S, Finazzer M, Bernard M, et al. Silicon photonics chip for inter-modal four wave mixing on a broad wavelength range [J]. Frontiers in Physics, 2019, 7: 128.

[104] Vitali V, Bucio T D, Liu H, et al. Fully integrated and broadband Si-rich silicon nitride wavelength converter based on Bragg scattering intermodal four-wave mixing[J]. Photonics Research, 2024, 12(3): A1.

[105] Lacava C, Ettabib M A, Bucio T D, et al. Intermodal Bragg-scattering four wave mixing in silicon waveguides[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(7): 1680-1685.

[106] Wang J M, Luo M, Qiu Y, et al. Dual-channel AND logic gate based on four-wave mixing in a multimode silicon waveguide[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 7802806.

[107] Wang Y H, Yang H F, Dong W C, et al. Highly nonlinear organic-silicon slot waveguide for ultrafast multimode all-optical logic operations[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(6): 3200712.

[108] Wang Y, H Wang C F, Lei L, et al. Enhanced four-wave mixing in graphene-integrated silicon slot waveguides[J]. Applied Physics Express, 2026, 19(4): 042002.

[109] Ostrovskis A, Cirjulina D, Salgals T, et al. SiP modulators for 400 Gbps on single wavelength in IM/DD systems: is this a reality?[C]//2025 25th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2025: 1-4.

[110] Pai M M, Christa S, Pai H A, et al. Silicon photonic transceivers for energy-efficient data center interconnects[C]//2025 Optical Communication, Photonics, Telecommunications, and Intelligent Machine Applications (OPTIMA), 2025: 73-78.

[111] LightCounting. Silicon photonics, LPO/LRO and NPO/CPO report[R/OL]. 2026-05. https://www.lightcounting.com/document/may-2026-silicon-photonics-lpolro-and-npocpo/377/toc.

[112] Yole Group. Silicon photonics 2025 - focus on SOI, SiN, LNOI InP platforms [R/OL]. 2025-09-05. https://www.yolegroup.com/product/report/silicon-photonics-2025/.

[113] NVIDIA. Quantum-X silicon photonic switch and spectrum-X optical system [R/OL]. 2025-03-18. https://investor.nvidia.com/news/press-release-details/2025/NVIDIA-Announces-Spectrum-X-Photonics-Co-Packaged-Optics-Networking-Switches-to-Scale-AI-Factories-to-Millions-of-GPUs/default.aspx.

[114] 唐雄燕, 王泽林, 沈世奎, 等. 智算光互联的架构、关键技术及应用[J]. 光学学报, 2025, 45(13): 522-541.
Tang Xiongyan, Wang Zelin, Shen Shikui, et al. Architecture, technologies, and application of optical interconnects for AI datacenters [J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(13): 522-541. (in Chinese)

[115] 张翔, 张浩, 崔文林, 等. 光电融合计算系统研究进展与展望[J]. 光学学报, 2025, 45(17): 93-117.
Zhang Xiang, Zhang Hao, Cui Wenlin, et al. Research progress and perspectives in optoelectronic computing systems[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(17): 93-117. (in Chinese)