

· 科学论坛 ·

## 纳光电子与光子芯片研究:发展与挑战\*

龚旗煌<sup>1\*\*</sup> 罗先刚<sup>2</sup> 刘伍明<sup>3</sup> 戴道铤<sup>4\*\*</sup> 李涛<sup>5</sup>  
肖云峰<sup>1</sup> 唐华<sup>6\*\*</sup> 何杰<sup>6</sup> 刘克<sup>6</sup>

1. 北京大学 物理学院, 北京 100871
2. 中国科学院 光电技术研究所, 成都 610209
3. 中国科学院 物理研究所, 北京 100190
4. 浙江大学 光电科学与工程学院, 杭州 310058
5. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 南京 210023
6. 国家自然科学基金委员会 信息科学部, 北京 100085

**[摘要]** 光子芯片被认为是“后摩尔时代”信息领域发展的核心技术之一。纳光电子学的发展为实现更高性能和更高集成度的光子芯片技术奠定了基础。同时,光子芯片对于突破电子芯片“卡脖子”的现实问题具有重要战略意义,有助于推动我国在未来光电信息产业的国际竞争中走出“缺芯”困境,并取得先发优势。基于国家自然科学基金委员会第312期“双清论坛”,本文总结了我国在纳光电子与光子芯片研究方面的重大需求,回顾了纳光电子与光子芯片领域近年来通过物理、材料、信息、制造等学科交叉融合所取得的主要进展和成就,凝炼了该领域未来5~10年的重大关键科学问题,探讨了前沿研究方向和科学基金资助战略。

**[关键词]** 纳光电子;光子芯片;基础研究;科学问题

21世纪以来,信息技术和信息产业突飞猛进,给人类社会带来了深刻而长远的影响。特别值得注意的是,近年来以现代信息网络为主要载体的数字经济正在成为全球经济社会发展的重要引擎。当前,全球信息技术进入新一轮加速期,5G、云计算、物联网、无人驾驶、智慧城市等新应用场景不断涌现,巨量数据的产生、传输、处理及存储是未来社会



**龚旗煌** 北京大学教授,中国科学院院士、发展中国家科学院院士。主要从事极端光学与信息光子学前沿及应用研究,近年来带领团队取得了一系列具有国际影响力的原创成果,获国家自然科学基金二等奖(2011)、何梁何利科学与技术进步奖(2016)、“中国高校十大科技进展”(2012、2014、2017)。担任中国光学学会理事长、国际光学委员会副主席、中国科协九届常务委员,美国光学学会、国际光学工程学会和英国物理学会等国际性学术组织会士。



**戴道铤** 浙江大学求是特聘教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者、美国光学学会会士。主要研究领域为硅基光电子集成芯片及应用,发表学术期刊论文260余篇。曾获中国光学学会王大珩光学奖—中青年科技人员光学奖、光学科技奖一等奖,浙江省自然科学奖一等奖等。目前主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重大研究计划集成项目等,担任 *Optical and Quantum Electronics* 期刊主编、2022年亚洲通信与光子学国际会议(ACP 2022)等大会共主席等。



**唐华** 国家自然科学基金委员会信息科学部信息四处副处长兼激光技术与技术光学项目主任,主要从事科学基金管理工

收稿日期:2022-10-26;修回日期:2023-01-17

\* 本文根据第312期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email:qhong@pku.edu.cn;dxdai@zju.edu.cn;tanghua@nsfc.gov.cn

发展的基础,也是全球范围内各国激烈竞争的关键领域。因此,亟需发展未来信息技术,以满足信息产生、交换、感知、存储、处理等方面前所未有的重大需求,而高性能高集成度的芯片是未来信息技术发展的物理基础。

众所周知,半个世纪以来集成电路一直遵循摩尔定律快速演进<sup>[1, 2]</sup>,推进了信息社会的发展。目前,集成电路工艺已进展到 3 nm 制程,越来越逼近器件物理极限,由此带来的损耗、串扰、发热、能耗等问题以及接近原子尺度超精细制备的苛刻要求正成为集成电路进一步发展中难以跨越的瓶颈。同时,现有冯诺依曼计算系统采用存储和运算分离架构,存在“存储墙”与“功耗墙”双重瓶颈,严重制约了系统算力和能效的提升,成为信息技术未来可持续发展的障碍。

光子集成技术与光子芯片应运而生。光子芯片采用光子/光波作为信息载体,可实现巨量信息的精准获取、高速传输及并行处理。与传统电子芯片相比,光子芯片具有处理速度快、信息失真小、消耗能量少等优势,是支撑未来信息领域发展的基石之一,被认为是“后摩尔时代”的核心技术之一。近年来,数据中心、星链网络、超级计算、通信系统等信息领域重大应用及产业发展需求不断兴起和持续演进,对光子芯片提出了更严苛的要求和更强烈的需求。

首先,突破光子芯片单元器件性能瓶颈,达到 Tbps 级的超快速度和 10 fJ/bit 级的超高能效,方可满足未来信息传输及处理的实际需求,而显著缩减器件尺寸并增强光与物质相互作用是实现更快速度和更高能效的根本途径。其次,发展超大规模光子芯片,达到单片集成上万个甚至十万个光子器件,从而满足未来大规模光计算系统发展需求。然而,传统光子器件尺寸通常较大,导致整个集成芯片可能超出互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)流片掩模版标准尺寸(2.5×2.5 cm<sup>2</sup>),致使难以大规模生产制造,缩减单元器件尺寸是实现大规模光子集成芯片的有效方式。同时,从能耗的角度考虑,也需减小单元器件尺寸以降低功耗,避免集成规模受限于能源供给和热管理。再次,支撑信息领域发展的光子技术和电子技术具有极好的互补性,光电融合集成,特别是感存算一体化等片上系统,被认为是支撑未来信息技术的关键。然而,传统光子芯片特征尺寸远大

于集成电路芯片,不利于实现真正的光电融合,只有缩减光子器件尺寸,使之与集成电路尺寸相匹配。总之,将微米尺度的传统光子芯片推进到纳米尺度的新一代光子芯片是未来发展的必然趋势。

近年来,纳米光子学的快速发展使得深亚波长尺度光与物质相互作用的精细高效调控及高集成度功能器件成为可能。将纳米光子学与微电子相融合,形成纳光电子学方向,则有望实现更高性能和更高集成度的芯片,为突破“卡脖子”瓶颈技术奠定基础条件,也为“后摩尔时代”信息产业和数字经济持续迅猛发展提供关键技术支撑。研讨纳光电子与光子芯片中的物理基础与应用技术,凝练科学问题,可以进一步推动其科技进步和产业发展。在此背景下,2022年8月12—13日,国家自然科学基金委员会信息学部会同数学物理科学部和计划与政策局联合主办了主题为“纳光电子与光子芯片:物理与应用”的第312期双清论坛,来自国内20多个单位的40余名专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家对纳光电子与光子芯片发展现状与趋势、未来主要研究方向和科学问题进行了梳理,并建议了重点支持方向。

## 1 纳光电子与光子芯片研究背景与重大挑战

光具有极其丰富的信息维度(波长、相位、偏振和模式等)以及多样化的光与物质相互作用机制,在信息领域发挥着越来越重要的作用。微纳化与芯片化是信息系统中硬件发展的重要趋势。将光子芯片与集成电路相结合构建光电融合集成芯片被认为是“后摩尔时代”突破集成电路所面临的带宽和功耗瓶颈的主要技术路径之一<sup>[3, 4]</sup>。

鉴于光电子器件及光电融合集成芯片的重要战略意义,以美国为代表的西方发达国家瞄准大容量通信、高性能计算、高灵敏传感、先进成像等关键领域需求,相继从国家层面在学术界和产业界成立了专门研究机构并部署了光电融合集成技术重大研究计划,全力推进光电子器件及光电融合集成芯片的发展。例如,日本在2010年开始实施光子融合系统基础技术开发计划,作为其内阁府支持的尖端研究开发资助计划之一,目标在于2025年实现“片上服务器”以及“片上数据中心”;美国国防先期研究计划局在2018年宣布了第二阶段电子复兴计划项目

(Photonics in the Package for Extreme Scalability, PIPES), 目标在于实现人工智能、相控阵、传感器和数据处理等领域的突破性发展; 欧盟第八框架—地平线 2020 计划(光子集成技术项目)已经累计投入 64.7 亿欧元, 并于 2017 年发布“愿景文件”《欧洲的光时代》, 为欧洲光子学界制定计划和优先事项; 英国在 2020 年发布了光子长期研究计划, 确定了 70 个光电子研究主题, 研究内容涵盖了光电子材料、光学和物理现象、加工工艺、光电子器件和系统等重要研究领域。

我国在光电子器件及光电融合集成芯片相关研究领域也较早进行了布局。例如, 国家自然科学基金重大项目、重点项目等, 科技部重点研发计划在“十三五”期间的“光电子与微电子器件与集成”专项和“十四五”期间的“信息光子技术”专项等。在相关研究计划的支持下, 我国在光电子器件及集成芯片研究领域取得了较好的发展, 与美欧等发达国家基本处于同一水平。为满足未来信息及智能化社会发展需求, 需要发展具备普适性、可扩展性、高性价比与超小尺寸、超高速度、超大容量、超低功耗等优异性能的新一代光电子和光子芯片技术。1965 年, 摩尔在提出摩尔定律的著名文章中指出, 减小结构尺寸、提高集成度并通过功能复合突破单一材料性能极限, 是提高电子器件性能最有效的方法<sup>[5]</sup>。从物理上看, 上述电子器件的“尺寸—性能—集成度”关系, 也适用于以更高频率的电磁场—“光场”作为信息载体的光电子器件及芯片。进一步增强光与物质相互作用、减小结构尺寸不仅是实现光电子器件更快速度、更低功耗以及更高性能的物理基础, 也是实现光电子器件与集成电路(10 nm 及亚 10 nm 结构尺寸)有效集成及大规模光电融合的必然要求。这需要在更小的纳米尺度研究光与物质相互作用及其产生的新颖光电特性来突破现有理论和技术瓶颈和发展纳光电子与光子芯片技术。相比于微电子芯片, 光电子芯片种类繁多, 发展进程各异, 很多新型光电子芯片目前在全球范围处于尚未形成产品的研发阶段。因此, 积极推动纳光电子及光子芯片技术的研发, 在相关理论、方法、工艺等方面取得变革性、颠覆性突破, 对引领光电子芯片前沿和技术创新方向并取得先发优势从而在下一轮芯片的国际竞争中助力我国走出“缺芯”困境具有重要战略意义。习近平总书记 2022 年 6 月 28 日在武汉考察光电子信息产业时指出:“光电子信息产业是应用广泛的战略高

技术产业, 也是我国有条件率先实现突破的高技术产业”。

为了实现更小尺度、更高速率、更低功耗的光信息技术及系统, 我们需深入研究其功能器件结构中光子、电子、声子、激子、表面等离激元等信息载体的相互作用及多维调控技术, 全面探索并利用可能的新材料与新机制, 解决相互作用中光场局域、耦合与转化中的动量失配以及能量损耗问题。在此基础上, 进一步研究高性能纳光电子器件, 继而发展大规模光电融合技术并实现新一代光子芯片。值得注意的是, 发展纳光电子及光子芯片技术面临诸多挑战, 主要概括为以下几点: (1) 为克服光波与纳米结构的尺寸失配以及光子与电子等(准)粒子的速度失配等问题, 需深入研究纳米尺度光场局域、调控及光与物质相互作用机制; (2) 研究具备新机理、新特性的纳米光电子材料, 探明表面等离激元、激子、声子等准粒子参与光与物质相互作用的过程, 解决多材料体系异质集成及多物理场耦合问题, 进而构建新型高性能纳光电子器件; (3) 为构建高保真、低损耗纳光电子器件及光子芯片, 研究多材料体系功能器件及芯片的异质异构自动化设计、高精密加工、晶圆级测试封装等关键技术以及大规模纳光电子芯片流片制造平台; (4) 从国家层面超前部署纳光电子与光子芯片领域的基础研究, 建立多学科融合平台, 重视加强原理性突破和技术自主创新, 助力实现光电信息技术的跨越式发展, 加快推进纳光电子器件及光子芯片的产业化应用。

## 2 纳光电子与光子芯片研究现状与发展趋势

作为纳光电子与光子芯片的物质基础, 材料体系多元化发展是其功能多样性的必然要求。针对硅材料性能的各项局限, 往往需要引入不同的光电功能材料来实现互补。例如, 在光放大与激光产生方面, III-V 族半导体具有直接带隙和高光学增益, 近年来硅/III-V 异质集成光源发展迅速<sup>[6]</sup>, 已成功将 III-V 族芯片或晶圆直接键合到 SOI 晶圆上, 实现低成本片上集成, 目前已报道窄线宽和低相位噪声、可调谐和多波长的光源。在近红外波段光探测方面, 通过引入锗材料<sup>[7]</sup>, 可补充硅材料自身探测能力的不足, 且已实现标准化流片工艺。此外, 铌酸锂薄膜具有低吸收损耗、宽透明窗口、高二阶非线性光学系数/泡克尔斯电光系数和压电效应, 有望成为发展纳

光电子与光子芯片的重要材料平台。硅基铌酸锂薄膜体系展现出超高速调制能力<sup>[8]</sup>,有望成为新一代硅基高速调制器件的主流技术。而二维材料作为一种新形态功能材料,可用于光源、调制器和光电探测等功能器件,其异质集成具有重要研究价值<sup>[9]</sup>。值得注意的是,多材料体系异质集成的发展为光电子器件及芯片的发展注入了新的活力,但也带来了诸多亟待攻克工艺兼容性难题。

对于多材料体系异质集成器件及芯片,其制备工艺和封装技术同样至关重要,需发展与之相应的高精度、标准化、大规模的工艺平台。近年来,硅光技术受到关注,全球各国纷纷建立制造平台,包括比利时微电子研究中心(Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC)、新加坡先进微晶圆厂(Advanced Micro Foundry, AMF)(前身为微电子研究院(Institute of Microelectronics, IME))、美国 American Institute for Manufacturing (AIM) Photonics 和 Global Foundries (GF)(全球第三大传统集成电路代工企业)、日本产业技术综合研究所(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST)、法国原子能委员会电子与信息技术实验室(CEA-LETI)、上海微技术工业研究院(Shanghai Industrial  $\mu$  Technology Research Institute, SITRI)、中国科学院微电子研究所(Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, IMECAS)等。这些硅光平台通过多项目晶圆(Multi-Project Wafer, MPW)服务可提供微纳结构制备,但基本限于 CMOS 兼容材料体系和制程<sup>[10]</sup>,无法满足纳米尺度光电子结构及芯片制备工艺复杂多样化的需求。目前,尚未有薄膜铌酸锂、相变材料、二维材料等新兴光电材料的标准化流片工艺,制约了相关器件和芯片的发展。同时,由于自身尺度极小,纳光电子器件(尤其是光子器件)对工艺误差极为敏感,如何对芯片进行高精度的实时原位检测并进行实时修复成为未来大规模集成光电子芯片的关键技术。

总的来讲,发展多材料体系和相应工艺,进一步微缩光子器件使其与电子器件实现融合集成<sup>[11]</sup>,充分发挥光子技术高速、高带宽、低能耗、多维复用等优点和微电子技术在非线性操纵和功能多样性方面的优势,已成为重要的发展趋势。为此,应从能带理论、器件物理学、波动光学及热力学理论等物理基础出发,进一步降低器件尺寸,提高工作效率,突破带

宽、噪声、损耗、灵敏度等性能瓶颈,拓展器件工作波长及应用场景。以光通信为例,面向多维度复用技术的高密度集成收发芯片是其不断提升并行通道数,突破通信系统传输容量的关键技术。美国英特尔(Intel)公司 2022 年 6 月发布了总容量 1.6 Tb/s 的 8 波长复用硅基集成光通信芯片<sup>[12]</sup>,但其激光器和调制器占据了绝大部分芯片面积。由此可见,目前激光器、调制器等仍存在尺寸过大、集成度不高等问题,远远不能满足未来超大容量光通信的需求,阻碍了光通信技术的发展。因此,在实现高性能的同时,如何大幅度减小光电子器件的尺寸使其集成密度显著提升成为纳光电子与光子芯片研究的一个关键挑战。

在发展单元器件基础上,实际应用中芯片及系统的集成规模也飞速增大,甚至呈现出超过集成电路摩尔定律的发展速度<sup>[13]</sup>。目前,世界各国都积极推进大规模光电融合集成研究,包括仿真软件、芯片设计、芯片制造及封装测试等方面。我国也进行了全面部署并取得良好成效。在仿真软件方面,我国华大九天等单位具有较好基础,能提供比较完善的电磁场相关的仿真、设计、分析、测量解决方案,并提供无源/有源光电芯片及系统仿真设计软件、光电芯片仿真设计服务、微波/射频天线仿真设计服务。在光电子流片工艺平台方面,有 IMECAS 等优势单位,具备 130 nm 和 180 nm 工艺线。在光电集成芯片封测方面,有中国科学院半导体研究所等多家优势单位。要满足未来超大规模光子集成的发展需求,仍任重道远。我们需要从单元器件原理、材料及结构等源头创新出发,在高性能和大容差等方面取得突破性进展,并通过跨领域强强联合积极推进芯片设计与制造的标准化、自动化和智能化发展,最终在更大规模的集成芯片和更为深入的光电融合等方面取得重大进展,使之满足更为广阔的应用需求。

在应用层面,目前主要瞄准的是大容量光互联、多维度光感知、大规模光计算,并向量子领域迅速拓展。总体发展趋势是提升容量/算力/速率、减小器件尺寸、提高集成度、降低功耗等。在大容量光互联方面,当前代表性的通信光电子芯片的关键技术指标为:传输容量 11.7 Tbit/s (48 WDM $\times$ 4 MDM)、带宽密度 1 Tbit/mm<sup>2</sup>、芯片尺寸 11.7 mm<sup>2</sup>、能量效率 $\sim$ 1 pJ/bit、芯片功耗 11.7 W。在多维度光感知方面,目前的光电探测器大多只对光场强度敏感,往

往需借助其他光学元件或机械装置,才能感知波长、偏振、相位、角动量等多维度信息,因此迫切需要深入研究深亚波长结构近场光的分布及调控机理,从而实现片上光场多参量探测<sup>[14]</sup>。在大规模光计算方面,随着人工智能领域模拟计算加速<sup>[15]</sup>技术路径的收敛,算力、能效、算法等应用性指标的的实现成为光计算芯片的重点关注方向。目前光计算芯片算力均在 TOPS 级别,算力上最优的光计算芯片已逼近目前商用的微电子芯片;在能效方面,一般微电子芯片能效为 pJ/MAC 量级,而光电子芯片能效普遍为 fJ/MAC 量级,具有两个量级以上的优势;在算法层面,学术界与产业界已着手布局算法生态,在线训练算法等方面有所突破,但光计算芯片尚远不及电子芯片生态成熟,其实用化仍面临重大挑战。目前,比较有代表性的进展包括光电混合计算加速及大规模光子计算引擎等方面,验证了光子计算优越性,也展示了光子芯片与传统电子芯片的融合与协同。在集成光量子芯片方面,相继实现了片上集成的量子逻辑门、量子漫步、量子玻色采样、量子通信、量子计算及量子模拟<sup>[16]</sup>。我国在集成光量子信息技术领域的研究取得了一系列重要进展,推动了光量子信息系统发展。光量子芯片未来发展趋势主要为提升光量子信息处理芯片的大规模集成度和可编程能力以及扩展光量子芯片的多量子比特调控和信息处理能力。

总的来说,近年来纳光电子与光子芯片的相关研究日益成为全球科技竞争与合作最重要的焦点之一,在各国政府、国际学术界和工业界的高度重视和大力推动下,取得了诸多重要突破,其总体趋势和特征表现为:光电材料多样化和一体化;制造封装工艺规模化/标准化/自动化;光电子器件微纳化及融合集成;芯片及系统规模持续扩展;应用场景向大容量光互联、多维度光感知、大规模光计算、量子信息等领域不断拓展。

### 3 纳光电子与光子芯片关键科学问题与重点研究方向

#### 3.1 发展目标

目前,我国光子芯片领域的发展仍存在基础器件性能有待提高、芯片集成规模有待扩展、微纳加工体系有待完善、应用需求牵引有待加强等问题,属于关键卡脖子技术,并可能面临新的技术封锁威胁。因此,针对纳光电子与光子芯片的科学问题和我国

未来信息技术发展重大需求,需要开展相关学科的交叉合作研究,重点资助相关方向,提升我国纳光电子与光子芯片的物理及应用研究水平,推动我国信息技术的变革性发展,在新一代光电子芯片的国际竞争中占据主动地位。在此背景下,“纳光电子与光子芯片:物理与应用”双清论坛与会专家对纳光电子与光子芯片发展现状与趋势、未来主要研究方向和关键科学问题进行了梳理,并提出了相关领域的重点研究方向,概括如下:

#### 3.2 关键科学问题

##### 科学问题一:“深亚波长尺度光与物质相互作用”

由于常规半导体及介电结构受限于光学衍射极限,对光场局域能力通常只能达到  $\lambda_0/2$  程度(远场极限)。如何进一步压缩光场至深亚波长尺度,需要从理论、材料、结构等多方面研究光场调控的机理。在深亚波长尺度下,光与物质相互作用需要得到大幅增强,才有望提升光电子器件的性能。因此,如何实现并利用光子与电子、光场与电场在微纳尺度同时同域强约束和强相互作用,是纳光电子与光子芯片领域面临的一项关键科学问题。其研究属于前沿科学,涉及到材料、物理、制备、表征等理论实验融合及多学科交叉,包含:如何通过新材料和新波段的光场束缚机制以及高密度波导之间选择性耦合增强和抑制原理,实现超紧凑低损耗低串扰光电功能器件;如何在纳尺度谐振腔内调控光场,实现光子的局域强约束以及电子在同一局域的有效注入、提高受激辐射效率和光子收集效率、抑制非辐射跃迁,并进一步实现低阈值、高转换效率光源;如何构建纳光子结构压缩光场模式体积以及微纳电极结构增强局域电场,增强电场与光场相互作用,实现高效、大带宽、低能耗光调制;如何在器件尺寸改变时,权衡探测带宽和响应度的关系,提升光探测性能,并深入研究深亚波长结构近场光分布及调控机理,实现片上光场多参量探测;如何从实验上检测纳米尺度光与物质相互作用超快过程中能量、动量的精确演化、调控和验证并构建理论模型。

##### 科学问题二:“片上多场融合协同及高速高效调控”

片上光互联网络、感存算一体化等新兴应用,不仅需要超小尺寸器件,而且已经不再满足于依赖单一物理量完成信息的处理。如何构建包含光、电、声、热、磁、力等的多场融合芯片以及各物理场在纳

米尺度空间强局域下相互之间的耦合和高速高效调控,是一项关键科学问题。需要从器件物理场模型入手,结合材料热光、电光、声光、磁光等特性,探索各物理场对光场模式的影响机制及可控性,分析大规模光子集成片上多物理场的兼容及互扰问题,建立多材料融合集成芯片中的信号一体化建模理论,为低功耗低损耗器件设计提供理论基础。探索光子器件和微电子电路融合新架构以及多物理场全链路联合仿真新方法,突破一系列光电融合仿真设计技术瓶颈。该项研究的重大突破将有力推动片上光互连网络、感存算一体化等实际应用,进一步支撑相关领域产业发展。

### 科学问题三：“跨材料跨尺度规模化异质异构集成”

多场融合集成芯片的关键是解决多材料体系异质异构集成难题,涉及硅、锗、III-V 族半导体材料、铌酸锂薄膜材料、相变材料以及低维材料等。因此,针对超大容量和超大规模集成,需解决高质量、大面积的多材料异质集成可控制备共性科学问题,包括晶体定点成核、大面积晶体生长动力学行为、异质材料表面处理等,涉及外延生长、剥离、转移和键合等多种工艺;针对超低能耗、超低损耗、超高速等需求,解决多材料异质结构中的表界面调控与作用机理。以此为基础,发展面向光电融合集成芯片的异质异构集成技术,发展集成电路 CMOS 后端工艺兼容的可多层集成的高精度制备技术,实现纳光子—微电子融合集成工艺,并降低成本和提高良率,奠定纳光电子与光子芯片发展的关键基础,并从根本上有力推动其更为广泛的产业应用。

### 3.3 重点方向

纳光电子与光子芯片相关研究领域将成为世界各国积极推进和激烈竞争的重大战略高地,需要在理论基础和技术工艺等方面取得突破,以满足光计算、光感知及光量子等重大应用需求,包括:(1) 如何实现超小型光电子器件;(2) 如何实现多材料体系异质异构功能集成;(3) 如何有效融合光子与电子芯片技术;(4) 如何推进光子芯片在光互联、光传感、光计算、量子计算等领域中的应用。本次双清论坛与会专家经过深入研讨,以“科技自立自强”为指引,结合世界科技前沿、国家重大需求以及产业发展瓶颈,建议未来 5—10 年应着重围绕以下三个方面,通过多学科交叉开展原创性研究。

### 重点方向一：纳光电子前沿基础与理论研究

纳光电子与光子芯片技术涉及到光学、物理、材料、微纳制造、半导体、量子力学等多个关键学科,是一项多领域融合集成的系统性工程,需从源头上创新,系统性地深入开展新物理及新应用研究,凝聚优势力量、协同探索,解决其基础科学问题。具体包括:深入研究纳光电子体系光与物质相互作用,从理论、材料、结构等方面探索将光场压缩至深亚波长尺度并显著增强光与物质相互作用的新方法,大幅提升光电子器件的性能;结合实际制造工艺建立完备物理模型,从理论上探明器件性能瓶颈及其极限;研究实现极低损耗的强约束光波导、超高品质因子和超小模式体积的光学谐振腔等关键功能结构与元件的新途径;研究光子与电子、光场与电场在微纳尺度的同时、同域强约束和强相互作用,探索超高速度和超高效率的光场调控新机制,研究光调控及光传输过程中能量损耗机制,研究新材料和新波段的光场束缚机制以及高密度波导耦合增强和抑制原理,探索实现超紧凑低损耗低串扰光电功能器件的新方法;研究纳尺度谐振腔内的光场调控,探索提高受激辐射效率和光子收集效率、抑制非辐射跃迁的新机制,并研究低阈值、高转换效率的纳米光源;研究可压缩光场模式体积的纳光子结构以及增强局域电场的微纳电极结构,进而研究高效率、大带宽、低能耗的光调制方法;研究深亚波长结构近场光分布及调控机理,探索实现片上光场多参量探测的新方法;研究面向光互联、光感知及光计算等重大应用的大规模集成光子芯片新架构,探索其纳米尺度光、电、热、力等多物理场融合与协同机制,突破未来光子芯片跨尺度和跨材料体系发展面临的理论制约和技术瓶颈。

### 重点方向二：纳光电子功能器件与关键技术

作为“后摩尔时代”信息技术的重要支撑,纳光子芯片在功耗、速度、尺寸、并行性等方面都极具潜力,亟需融合多学科力量,突破器件性能瓶颈,进而建立各类高性能单元功能器件体系。研究极低损耗强约束光波导、超高品质因子和亚波长超小模式体积的光学谐振腔等强约束纳光子无源器件;研究超小尺寸、高效率、低能耗纳光电子有源器件,包括:大规模、多波长、低阈值电泵浦微纳激光器;基于新型电光材料的宽光谱、大带宽、低驱压微纳电光调制器件;能实现强度、偏振、波长、相位等多维光场信息检测的片上光探测分析器件。

与此同时,针对纳光电子与光子芯片开展新一代制备工艺以及封装测试关键技术研究,包括:在纳米尺度上研究关键光子学材料薄膜(如单晶铌酸锂、碳化硅、绝缘体上硅、III-V族化合物半导体、二维材料等)的低损伤集成技术;高集成度、高精度、高通量、多维度芯片结构制造技术;精准可控的大规模异质异构集成工艺和计算机辅助设计;面向纳米尺度结构制作的核心工艺设备、高密度光电共封装设备、无损在线测试测量设备等,建立纳光电子芯片工艺平台,大力推动我国纳光电子领域的创新研究和技术应用,并带动相关行业的发展,形成更加完备的技术链,支撑未来信息产业的进一步持续发展。

### 重点方向三:纳光电子集成芯片及应用

大容量光互联、多维度光感知、大规模光计算、量子信息处理等新兴应用场景和产业需求不断涌现,对光子芯片集成规模也提出了更高的要求。因此,应瞄准这些应用中的痛点问题,充分发挥纳光电子芯片的优势,推动相关应用的快速发展,为数字经济发展提供技术引擎。研究高密度集成(优于 $100\mu\text{m}^2/\text{信道}$ )、超多信道( $>100$ )、超大带宽( $>100\text{GHz}$ )、超低能耗( $10\text{fJ/bit}$ 级)的高速多维复用光通信发射芯片,大幅度扩展时、频、空域光通信容量;面向机器视觉、自动驾驶、生命健康和工业自动化等传感应用,研究大视场角芯片化光学相控阵、微型高功率面发射激光器阵列、红外高灵敏度单光子探测、高通量分布式可穿戴光电传感等系统;利用特定纳米结构调控光的干涉、衍射、谐振等物理现象,映射特定的算子或者复合函数组合,实现超高速、低能耗光计算,突破传统微电子处理器性能瓶颈;提高光量子芯片上单光子数目和光量子比特数目,发展大规模集成的可编程光量子信息处理芯片以及大规模光量子计算芯片与超大规模集成电路经典信息处理/驱动芯片的系统级混合集成。

### 参 考 文 献

- [1] Schaller RR. Moore's law: past, present and future. *IEEE Spectrum*, 1997, 34(6): 52—59.
- [2] Theis TN, Wong HSP. The end of Moore's law: a new beginning for information technology. *Computing in Science & Engineering*, 2017, 19(2): 41—50.
- [3] Solli DR, Jalali B. Analog optical computing. *Nature Photonics*, 2015, 9(11): 704—706.
- [4] Ilaria C, Cosimo L, Georg R, et al. Roadmap on multimode photonics. *Journal of Optics*, 2022, 24(8): 083001.
- [5] Moore GE. Cramming more components onto integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 86(1): 82—85.
- [6] Wang ZC, Abbasi A, Dave U, et al. Novel light source integration approaches for silicon photonics. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(4): 1700063.
- [7] Lischke S, Peczek A, Morgan JS, et al. Ultra-fast germanium photodiode with 3-dB bandwidth of 265 GHz. *Nature Photonics*, 2021, 15(12): 925—931.
- [8] Hu YW, Yu MJ, Zhu D, et al. On-chip electro-optic frequency shifters and beam splitters. *Nature*, 2021, 599(7886): 587—593.
- [9] Jia LN, Wu JY, Zhang YN, et al. Fabrication technologies for the on-chip integration of 2D materials. *Small Methods*, 2022, 6(3): 2101435.
- [10] Atabaki AH, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip. *Nature*, 2018, 556(7701): 349—354.
- [11] Siew SY, Li B, Gao F, et al. Review of silicon photonics technology and platform development. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(13): 4374—4389.
- [12] Stadler L. Intel labs announces integrated photonics research advancement. (2022-06-28)/[2022-10-24]. <https://www.intc.com/news-events/press-releases/detail/1555/intel-labs-announces-integrated-photonics-research>.
- [13] Jin W, Feshali A, Paniccia M, et al. Seamless multi-reticle photonics. *Optics Letters*, 2021, 46(12): 2984—2987.
- [14] Wei JX, Xu C, Dong BW, et al. Mid-infrared semimetal polarization detectors with configurable polarity transition. *Nature Photonics*, 2021, 15(8): 614—621.
- [15] Nahmias MA, de Lima TF, Tait AN, et al. Photonic multiply-accumulate operations for neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 26(1): 1—18.
- [16] Wang JW, Sciarrino F, Laing A, et al. Integrated photonic quantum technologies. *Nature Photonics*, 2020, 14(5): 273—284.

## Nano-optoelectronics and Photonic Chips: Progresses and Challenges

Qihuang Gong<sup>1\*</sup>    Xiangang Luo<sup>2</sup>    Wuming Liu<sup>3</sup>    Daoxin Dai<sup>4\*</sup>    Tao Li<sup>5</sup>  
Yunfeng Xiao<sup>1</sup>    Hua Tang<sup>6\*</sup>    Jie He<sup>6</sup>    Ke Liu<sup>6</sup>

1. *School of Physics, Peking University, Beijing 100871*

2. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*

3. *Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

4. *College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058*

5. *College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023*

6. *Department of Information Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

**Abstract** Photonic chip is recognized as the core technology in the development of information field in the post Moore era. The development of nano-optoelectronics has provided a solid foundation for realizing high-density and high-performance chips. Meanwhile, photonic chips have shown strategic significance for overcome the challenges of electronic integrated chips, potentially helping China to solve the problem due to the lack of chips in the future international competition of the optoelectronic information industry. According to the discussions and the proposals from the 312th Shuangqing Forum, this paper gives a summary for the major demands in the research and development of nano-optoelectronics and photonic chips in China. A review is also given on the major achievements in the field of nano-optoelectronics and photonic chips in recent years through the inter-discipline cooperation with physics, materials, information, manufacturing and others. Furthermore, this paper also gives a discussion about the major key issues in this field in the next 5 ~ 10 years as well as the potential frontier research directions recommended to National Natural Science Foundation of China for funding.

**Keywords** nano-optoelectronics; photonic chips; fundamental research; scientific issues

(责任编辑 崔国增 张强)

\* Corresponding Authors, Email: qhgong@pku.edu.cn; dx dai@zju.edu.cn; tanghua@nsfc.gov.cn