

▶ 前沿交叉研判



光电融合集成技术 发展战略研究报告

光电融合集成技术发展战略研究 项目组

国家自然科学基金委与中国科学院联合资助

2024

报告撰写组

祝宁华 中国科学院半导体研究所
陈良惠 中国科学院半导体研究所
郝 跃 西安电子科技大学
龚旗煌 北京大学
王立军 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
杨德仁 浙江大学
刘 明 复旦大学
黄 如 东南大学
王建宇 中科院上海技术物理研究所
毛军发 深圳大学
江风益 南昌大学
吴汉明 浙江大学
龙 腾 北京理工大学
罗 毅 清华大学
李 明 中国科学院半导体研究所
张运炎 浙江大学
王 立 南昌大学
熊 兵 清华大学
王兴军 北京大学
杨冠华 中国科学院微电子研究所
李东升 浙江大学
方彦俊 浙江大学
肖云峰 北京大学
朱 瑞 北京大学

徐卫明	中科院上海技术物理研究所
邱 橙	中科院长春光机所
张伟锋	北京理工大学
陈建平	上海交通大学
周 亮	上海交通大学
吴南健	中国科学院半导体研究所
刘力源	中国科学院半导体研究所
祁 楠	中国科学院半导体研究所
肖 希	中国信息通信科技集团
冯俊波	联合微电子中心
谭 旻	华中科技大学
苏翼凯	上海交通大学
余明斌	上海微系统所/上海工研院
戴道锌	浙江大学
郑学哲	苏州旭创科技有限公司研究院
孔月婵	中国电科 55 所
赖明澈	国防科技大学
胡强高	武汉光迅科技股份有限公司
赵 佳	山东大学
耿 莉	西安交通大学
骆军委	中科院半导体所
郑 凯	北方集成电路技术创新中心
潘时龙	南京航空航天大学
池保勇	清华大学
陈少强	华东师范大学

摘要

光电融合集成技术是突破后摩尔时代算力、通信速率与能耗瓶颈的关键，具有重大战略价值。它结合光子的高带宽、低损耗传输与电子的高精度计算、存储优势，在光通信、国防、人工智能和智能感知等领域展现出巨大潜力。然而，该技术面临材料兼容性、光场多维度调控、设计理论与工艺平台等多方面的挑战。

全球竞争激烈，美国通过 DARPA 的“电子复兴计划”等战略布局，引领光电融合创新，其产业界如 Intel 在高速 SerDes 和星地激光通信方面取得显著成果。欧洲通过“地平线计划”支持光子产业发展，日本长期投入光电融合系统技术，NTT 公司实现了 1.2Tb/s 相干光模块。全球工艺平台呈现高校科研平台、国家级研发中心和领先企业自建平台的三级梯队格局。

我国在该领域起步较晚但发展迅猛，部分方向已达到国际先进水平。国家信息光电子创新中心实现了 100G-400G 硅光收发芯片产业化，清华大学研发的光电融合芯片 ACCEL 能效显著提升，航天 504 所实现了 10Gbps 星地激光通信。但我国仍面临工艺平台分散、加工能力与国际领先水平存在差距、核心设计软件缺失、封装标准和规模化制造能力不足以及系统级应用需加强等挑战。

针对以上情况，本报告提出以下发展建议：在芯片层面，重点突破硅基中红外光电集成、光电超大规模异质异构集成芯片、多功能多通道可重构微波光子芯片以及光子智能芯片；在系统与应用层面，布局感算一体的高精度多维感知成像技术、空间激光骨干通信组网技术、超大容量超低功耗光通信芯片与模块、多芯粒光计算/传感系统、共封装集成与高速片间光 I/O 技术，以及统一的光电融合集成工艺平台技术；在政策与机制层面，建议启动国家自然科学基金委“光电融合集成重大研究计划”，加强体系化基础研究，加大核心工艺研发投入，健全产业生态链，建立标准化体系，推动一体化协同发展。

光电融合集成技术是未来信息技术竞争的战略制高点。亟需在国家层面进行顶层设计和资源统筹，打通全链条，构建自主可控的创新生态，实现“光-电-算”一体化突破，支撑我国信息科技领域的全面跃升。

Abstract

Photonics-electronics convergence and integration (PECI) technology represents a pivotal breakthrough in addressing the limitations of computing power, communication speed, and energy consumption in the post-Moore era, holding significant strategic value. By integrating the high bandwidth and low-loss transmission of photons with the high-precision computing and storage capabilities of electrons, this technology has demonstrated substantial potential across various fields, including optical communication, defense, artificial intelligence, and intelligent perception. However, it confronts multifaceted challenges related to material compatibility, multi-dimensional tuning mechanisms of optical fields, design theories, and process platforms.

The global competition in this domain is intense. The United States, through strategic initiatives such as DARPA's "Electronics Resurgence Initiative", has taken the lead in photonic-electronic convergence innovation, with its industry, exemplified by Intel, achieving remarkable results in high-speed SerDes and satellite-to-ground laser communication. Europe has supported the development of the photonics industry through the Horizon program, while Japan has made long-term investments in PECT system technology, with NTT realizing a 1.2Tb/s coherent optical module. The global process platform is characterized by a three-tier structure, comprising university research platforms, national research and development centers, and leading enterprise-built platforms.

China, although a latecomer in this field, has experienced rapid development and has reached international advanced levels in some areas. The National Information Optoelectronics Innovation Center has achieved industrialization of 100G-400G silicon photonics transceiver chips. Tsinghua University has developed the photonic-electronic convergence chip ACCEL, which has significantly improved energy efficiency. The 504th China Academy of space technology has realized 10Gbps satellite-to-ground laser communication. However, China still faces challenges such as a fragmented process platform, processing capabilities lagging behind international leading levels, a

lack of core design software, insufficient packaging standards and large-scale manufacturing capabilities, and the need to strengthen system-level applications.

In light of the above, this report proposes the following development suggestions: at the chip level, focus on breaking through silicon-based mid-infrared photonic-electronic integration, ultra-large-scale heterogeneous photonic-electronic integration chips, multi-functional and multi-channel reconfigurable microwave photonic chips, and photonic intelligent chips. At the system and application level, deploy integrated sensing and computing technology for high-precision multi-dimensional perception imaging, spatial laser backbone communication networking technology, microwave photonic broadband intelligent precision guidance technology, ultra-large capacity and ultra-low power optical communication chips and modules, multi-chiplet optical computing/sensing system, co-packaged integration and high-speed chip-to-chip optical I/O technology, and unified process platform technology for PECTI. At the policy and mechanism level, it is recommended to launch the "Major Research Plan for Photonics-Electronics Convergence and Integration" under the National Natural Science Foundation of China to strengthen systematic research on PECTI, increase R&D investment in core processes, improve the industrial ecosystem, establish a standardization system, and promote integrated and coordinated development.

PECTI technology is a strategic high ground in future information technology competition. There is an urgent need for top-level design and resource integration at the national level to break through the entire chain, build an independent and controllable innovation ecosystem, achieve integrated breakthroughs in "light-electricity-computation" and support comprehensive advancements in China's information technology field.

目录

- 摘要 I
- Abstract.....II
- 一、 战略地位 1
- 二、 发展规律与研究特点 3
 - 1. 面临的主要科学与技术问题 3
 - 1) 光电一体化协同设计理论与方法..... 3
 - 2) 多材料体系异质异构集成兼容方法..... 3
 - 3) 微纳尺度下光电融合多维调控机制..... 4
 - 4) 多功能高效融合集成技术..... 4
 - 5) 光场与电场等多物理场高效相互作用机理..... 4
 - 2. 未来发展趋势 5
- 三、 国内外发展现状 7
 - 1. 光电融合集成方面的国际战略布局 7
 - 2. 国际上工艺技术的发展现状 7
 - 3. 光电融合集成在通信领域的发展现状 8
 - 4. 光电融合集成在国防领域的发展现状 10
 - 5. 光电融合集成在计算领域的发展现状 10
 - 6. 光电融合集成在智能感知领域的发展现状 12
- 四、 我国发展现状 15
 - 1. 我国在光电融合集成方面的战略布局 15
 - 2. 我国工艺技术发展现状 15
 - 3. 我国系统与应用发展现状 18
- 五、 发展布局建议 21
 - 1. 总体任务建议 21
 - 2. 集成芯片级任务建议 22
 - 1) 硅基光电集成芯片..... 22

2) 光电融合超大规模集成芯片.....	22
3) 微波光子芯片.....	23
4) 光子智能芯片.....	24
3. 系统与应用任务建议	24
1) 感算一体的高精度多维感知成像技术.....	24
2) 永不掉链的空间激光骨干通信组网技术.....	25
3) 超大容量超低功耗光通信芯片与模块.....	25
4) 多芯粒光计算/传感系统	25
5) 共封装集成与高速片间互连.....	26
6) 光电融合集成的工艺平台技术.....	26
六、 资助机制与政策建议	27
1. 建议启动国家自然科学基金委“光电融合集成重大研究计划”，加强光电融合集成的体系化研究.....	27
2. 加强光电融合集成工艺研发投入，健全产业上下游生态链	27
3. 建立光电融合集成设计和制备技术标准化体系，为一体化协同的光电融合集成技术凝聚力量.....	27

一、 战略地位

微电子与光电子技术是现代信息技术发展的重要基础与核心科技命脉。以晶体管为代表的微电子器件在近 50 年间的集成规模提升了 5000 万倍，推动了电子设备的微型化与智能化，极大地提高了设备的算力，降低了功耗，支撑了新一代人工智能革命。以半导体激光器为代表的集成光电子器件，推动了现代通信技术与网络技术的快速发展，促进了互联网产业的规模化发展。

光子与电子是两种最主要的信息载体，两者物理特性不一样，使两者在信息系统中各有所长。微电子技术具有高的频谱分辨率，支持大量数据的快速存储与写入读出，适合高速的数字计算与信息处理。核心器件以晶体管为基本单元，可以通过不同节点的工艺尺寸缩减来实现集成度与性能的提升。然而随着二维晶体管结构逐渐逼近物理极限以及加工制造的成本大幅提升，单个芯片的性能遭遇了瓶颈，芯片间的通信速率与功耗成为了系统性能的主要制约。光电子技术的工作频率范围比微电子通常高出两个数量级，因此具有极好的带宽性能。同时针对光子的多物理维度调控，能够进一步地大幅提升光电子信息的传输速率。光子的传输通常通过低损耗的波导结构进行，传输损耗低，适合高容量信息的长距离传输。然而光电子器件的基本单元种类较多，同时受衍射极限的影响，无法实现规模化的尺寸缩减。目前的集成度仅相当于微电子技术 20 世纪 80 年代水平。

光电融合集成有望实现微电子与光电子技术的有机融合，解决后摩尔时代系统的速率、能耗与算力瓶颈，并催生全新的智能化应用。

（1）在光通信与互联方面，伴随着数据通信容量需求的快速增长，对相关器件的速率和带宽都提出了更严峻的挑战，尤其是高速大容量光电子器件成为解决该问题的关键，而微电子集成技术起步早，已陷入摩尔定律的瓶颈。光电融合集成技术有望将光互连系统所需的高速调制、高速接收、多维复用等功能元件进行阵列化且实现紧密集成，可显著缩小光电集成芯片及模块尺寸，易于拓展且能够持续推进其性能升级、能耗降低和成本降低。

（2）在雷达应用方面，光电融合集成技术可实现射频前端、数字芯片和光学处理芯片的全集成化，实现数、模一体化和光、电一体化，从而达到低成本规模化的雷达系统生产以及高密度、低功耗和高速的信息处理。

（3）在光子人工智能加速计算方面，带有人工神经网络的深度学习是关键技术，其神经网络算法包含大量的乘法和累加计算。传统基于电学网络的中央处理器很难执行这些操作，尤其是完成大规模并行信号处理时，基于冯·诺依曼架构的中央处理器存在技术瓶颈，从而限制了计算效率以及计算准确性和精度。此外，电学互连的能耗巨大，速率和带宽又难以满足人工智能的爆发式增长。光电融合计算芯片可实现人工智能深度神经网络、神经形态等特定计算方法的显著加速，解决算力需求迅速增长和电子芯片摩尔定律失效之间的矛盾，具有高带宽、高并行处理、低时延以及低功耗等特点，提供了一种解决人工智能算力问题的新路径。

（4）在智能光传感方面，光电融合集成进一步融合微电子体系，能有效减少传感器内部的分立元器件数量，在传感器内部实现光电协同，具有更低的功耗和灵活的可重构性。此外，光电融合技术可以实现光互连传输等后端器件和单片集成数字电路预处理电路的芯片级集成，实现光传感器芯片化和小型化，极大提高了传感器的稳定性和环境适应能力，扩展光传感器的应用场景，全面满足万物互联时代的技术要求。

纵观国民经济发展的需求，光电融合集成技术在我国具备重要的应用价值。该方向为我国光电子领域的发展提供了一个新的契机，是发展大规模实用化的必经之路。

二、 发展规律与研究特点

1. 面临的主要科学与技术问题

光电融合与集成的发展需要材料、设计、工艺、芯片、封装、系统应用的全链条体系化的多方面融合。具体而言，光电融合集成所面临的主要科学与技术问题如下：

1) 光电一体化协同设计理论与方法

在光电融合设计方面，需要逐步完善光电融合与调控基础理论，建立光电融合设计集成环境，开发应用于物理仿真、器件模型、链路仿真、版图设计与验证等设计全流程的专用工具，形成新的设计方法。同时，需要结合国内工艺平台，开发面向设计自动化的光电融合元件库，建立自主可控的集成光电子设计生态。

2) 多材料体系异质异构集成兼容方法

目前光电子的主要材料集成平台包括三五族、硅基、氮化硅和铌酸锂等。其中三五族平台能够实现从光发射、传输到探测等所有功能的全集成，但晶圆整体价格昂贵尺寸受限，且不易与硅基微电子芯片集成。硅基平台制备工艺成熟、结构紧凑，且与微电子 CMOS 工艺兼容，是实现与微电子融合的理想平台，但因为其是间接带隙材料，难以实现高效率发光。因此硅基片上光源是制约其发展的主要瓶颈之一。氮化硅平台具有低损耗、高承受功率等优点，是无源器件的重要平台，但难以实现高速调制等功能。薄膜铌酸锂平台具有良好的电光调制以及其他光学和声学性能，也具有较低的传输损耗，是新一代的集成光学平台，但其器件尺寸较大，不易与硅基微电子芯片集成。由于目前集成材料体系的各自特性与优势，目前还难以通过单一材料体系实现高性能的光电融合集成器件。如何通过混合集成的方式实现多材料体系融合与器件性能提升是此方面的关键技术与制约瓶颈。

3) 微纳尺度下光电融合多维调控机制

光子与电子具有多个维度的物理参数，如幅度、偏振、频率、时间分布、空间分布、相位、自旋等。波分复用与偏振复用技术极大地提升了光通信的传输速率。近年来，片上的模式复用与空间复用技术也成为了研究热点，进一步地拓展了物理资源的利用。如何进一步高效拓展物理参数的调控维度以提升系统容量，特别是含空间模式的片上多维度融合及其与光纤的兼容，优化通道间串扰、系统插损等核心系统性能以及提升多维调控器件加工能力是此方面的关键技术与制约瓶颈。需要在材料体系、器件设计、加工平台、智能控制上实现对多维调控技术的核心突破。

4) 多功能高效融合集成技术

面对新一代信息系统对于感知、存储、处理、通信等需求的提升，需要将不同功能的结构、器件、芯片集成到一体。将光电子与微电子芯片作为核心硬件，按一定的架构组织，辅以智能算法的智能微系统技术是超越摩尔的重要技术路线，也是面向下一代信息技术的颠覆性技术。如何针对“感-存-算-能-动”等功能单元实现协同设计与不同模块间的异质异构集成工艺是此方面的关键技术与制约瓶颈。

5) 光场与电场等多物理场高效相互作用机理

光电子与微电子的集成逐渐从早期的基于分立芯片的传统封装集成，过渡到基于多芯粒单一基板的先进共封装集成，到进一步走向单一衬底的三维混合集成。在这个过程中互连密度与速率逐步提升，互连功耗逐步降低。目前通过混合键合技术，共封装集成实现了 10 μm 间距的互连密度，并有望进一步减小到 5 μm 。但封装带来的寄生电容与相应的静电释放结构限制了功耗的进一步降低。CMOS 兼容工艺的单一衬底集成能够实现最佳的速率与功耗性能，但需要开发相应工艺，且由于光电子器件尺寸远大于微电子器件，整体的制造费用昂贵。如何通过实现光电子微电子融合集成的设计、加工与封装工艺开发是此方面的关键技术与制约瓶颈。

2. 未来发展趋势

未来芯片技术正迅速朝着光电子与微电子融合集成的方向发展，光电融合集成技术旨在实现光电子技术与微电子技术的优势互补，进而突破信息技术在高速率、低功耗、智能化等方面的瓶颈。针对未来主要应用场景，迫切需要解决光电融合技术的理论体系、光电一体化协同设计理论与方法、光电融合先进工艺和材料、光电芯片制造及封装测试技术等关键问题。

（1）高密度硅基光电集成。硅基光电集成技术致力于研究和发展以光电子为信息载体的硅基大规模集成芯片。这一技术依托硅或与其兼容的材料，采用 CMOS 工艺，在硅衬底上同步制备光子和电子功能器件，制备光电一体化的大规模集成芯片。硅基光电集成技术能充分发挥微电子工艺的成熟性和低成本优势，同时能结合光子器件与系统所具备的极高带宽、超快传输速率以及高抗干扰性等特性。

（2）超大规模芯片集成。光电融合超大规模集成技术，即在硅基光电集成的基础上，融合光子集成多材料体系的优势，实现 InP、硅基和铌酸锂材料的异质异构集成，并实现大规模、阵列化、多功能的光子器件集成，例如：激光器、调制器、放大器、探测器、偏振控制器、耦合器、滤波器等。目前已表现出下面三个主要发展趋势：一是光子集成晶圆和集成电路晶圆通过三维集成方式实现的晶圆级光电子集成；二是硅基光子集成回路和硅基微电子集成电路在同一晶圆的光电混合集成；三是基于多材料异质兼容的光电子集成。

（3）多功能、多通道、可重构微波光子集成芯片。微波光子芯片，作为光电融合芯片的系统级应用，集微波技术与光子技术之优势，在光域内完成高频宽带微波信号的生成、处理、传输及接收。微波光子技术充分发挥光纤宽带低耗传输的优势，具备大带宽、传输损耗低、重量轻、快速可重构及抗电磁干扰等特点，成为未来信息处理与接入领域的发展趋势及有效解决方案。相较于分立系统，微波光子芯片将显著降低系统体积和功耗，避免了单独封装每个器件的成本，减小了器件间耦合损耗，从而提高系统稳定性。下一步多功能、多通道及可重构的微波光子芯片优化方向包括：微波光子无源核心器件、微波光子有源核心器件以及微波光子阵列化器件，旨在实现一芯一系统，提升系统的超高集成度和稳定性。

（4）光子智能芯片。光电融合计算芯片可实现人工智能深度神经网络、大规模张量计算等特定计算方法，对传统电子芯片计算显著加速，解决迅速增长算力需求和电子芯片摩尔定律失效的矛盾，具有高带宽、多维度并行处理、低时延以及低功耗等特点。光子技术与人工智能技术融合，旨在研发智能光子处理器和光子加速器芯片，此为我国及全球科技前沿和研究焦点。光子智能芯片集成了类脑计算、光计算、光互连等多重优势，大幅提升智能计算的速度和能效。然而，光子类脑计算尚处于研究初期阶段，目前基于人工智能的微波光子系统，已实现光子模数转换、瞬时频谱测量以及集成光神经网络等领域的验证，提供了高能效比的计算能力。通过结合微波光子学的大带宽、灵活可调性和高速处理能力，以及人工智能算法对信号失真校正与补偿、失配与噪声抑制及智能学习与判决，实现信号系统优化与自主学习。

三、 国内外发展现状

1. 光电融合集成方面的国际战略布局

针对光电融合集成表现出的巨大发展潜力与优势，世界主要发达与发展中国家在此领域都进行了规划布局。其中，美国的 DARPA 早在 2011 年就推动了多样化可用异质集成 (DAHI) 计划，在其中部署了微电子光子异质集成 (E-PHI) 项目，该项目推动了 90WG 和 45CLO 的光电单片集成工艺平台的推出。在最近的电子复兴 (ERI) 计划中也推出了面向硅基光源集成的用于微尺度光学系统的激光器 (LUMOS) 项目，面向超大规模光互连的极端可拓展性光学封装 (PIPES) 项目，面向高效片间片上通信的光电融合嵌入式微处理器 (POEM) 项目等，推动多材料体系与多功能光电融合集成。美国能源部等部门也针对高性能计算系统中的多板卡互连推出了对应的项目。

欧洲在地平线计划下推出了 21 世纪光子研究计划以推动光电子产业发展，为高速 GeSi 调制探测、CMOS 工艺兼容的 SiN 平台，新材料体系集成的氮化硅平台等项目提供了资助。

日本从 2010 年起开展了光电子融合系统基础技术开发研究计划，目标是解决现有大规模集成电路芯片间的高速数据通信瓶颈，实现片间与片上的高效互连的计算系统。

2. 国际上工艺技术的发展现状

光电融合集成器件及芯片涉及到硅、SiN、铌酸锂等多种材料体系，其器件涉及无源器件和有源器件。面对未来融合集成规模化发展，高性能无源器件和有源器件均至关重要。值得关注的是，大规模集成芯片对无源器件的高均一性要求尤为苛刻，因而对其高水平加工能力提出迫切要求。这意味着工艺技术能力对光电融合集成发展的重要性进入了前所未有的新阶段。

纵观全球，光电芯片加工平台的发展可分为三个层级。第一层级是以新加坡 AMF、荷兰 Tu/e 等为代表的高校科研院所平台。如新加坡 AMF 隶属于新加坡科技研究局，专注硅基光电子技术及先进 MEMS 技术，拥有浸没式光刻机 45nm

制程 12 寸 CMOS 中试线、180nm 制程 8 寸先进工艺线。荷兰 Tu/e 则建有 InP 基集成光电芯片平台，是目前国际上仅有的提供 InP 基 MPW 流片服务的单位。第二层级是以比利时微电子研究中心(IMEC)为代表的政府领投非盈利创新中心。IMEC 建有超 10000 平米超净室，拥有 EUV 光刻机及 12 寸 CMOS 中试线、8 寸先进技术工艺研发线，是欧洲微电子技术科技创新中心。美国 2015 年成立了由纽约州立大学牵头的 AIM Photonics，投入总额达 6 亿美元，支撑大型企业及初创企业发展未来纳米技术。第三层级是以各集成电子企业自建平台，此类平台大多深耕 CMOS 领域多年，如 Intel、格罗方德等。其中格罗方德推出 45-nm CMOS 全兼容硅光芯片流片平台，是目前业界用来制作光电芯片所采用的最高工艺节点。

3. 光电融合集成在通信领域的发展现状

通信领域主要解决感知、计算和传感节点间、平台内的数据高速率、低延迟的光电互连，以及车、船、飞机、卫星等平台间的高速、高可靠、抗干扰多手段融合信息传输。光电融合集成技术在此领域主要解决信号发射、接收和处理三个环节的需求，致力于实现载荷的尺寸、重量和能耗的显著降低。其中，发射端包含激光器、调制器、配套驱动电路等，实现电光信号的高速转换；接收端包含探测器和 TIA 电路等器件，实现光电转换与电信号放大；信号处理包括多维复用器、高性能光开关、波长偏振控制单元和高带宽数模/模数转换，实现光电信息的信道复用、路由、关键性能调控以及信息类型的转换。

在短距光互连方面，2022 年，洛克希德·马丁和 Ayar Labs 公司开展了多节点融合感知与计算多系统集成平台的研究，通过高带宽、低延时的光互连总线，构建成一个“融合孔径”的高性能作战系统，通过光总线实现 11.2Tb/s 的互连带宽，整体平台功耗降低至现有水平的 1/5，载荷尺寸则减小一个数量级；在基础器件方面，2022 年 Intel 公司在 224Gb/s SerDes 中集成了 6bit 112GS/s 的 ADC，有效位达到 4.5 位；在星间/星地通信方面，2022 年美国完成了 TB 级红外传输项目（TBIRD），利用光电融合集成技术实现了 100Gb/s 星地下行激光通信试验测试，载荷重量仅为 2.24kg，实现了有史以来在轨最高激光通信速率及最轻载荷质量；在空地海跨域通信方面，谷歌下属 Aalyria 公司于 2022 年 9 月在窄波束（TightBeam）项目中利用高度集成相干光通信模块，实现了平流层气球间

1.6Tb/s 超高速相干光通信，且其通信载荷重量可控制在 10kg 以内；在无人平台通信方面，美国通用原子公司于 2022 年 10 月利用超轻量化、低功耗激光通信终端，实现了两架无人机间的抗干扰、低发现度/低截获率（LPI/LPD）激光通信，终端重量仅为 3.5kg，功耗为 20W 以下；在水下/跨介质光通信方面，美国 Sonardyne 公司推出了用于水下 AUV、ROV 等无人潜航器平台的超小型无线光通信设备，实现了 150m 距离、10Mb/s 速率通信能力。

欧盟在短距光互连方面于 2016 年启动硅基单片光电子器件(MODES)项目，研究基于 III-V 族材料和硅基波导的无源和有源光子器件；在星间/星地通信方面，于 2016 年开展了数据中心计划 EDRS 项目，采用高度集成化相干通信模块实现了 EDRS-A 和 EDRS-C 两颗高轨卫星，通信速率为 2.8Gb/s，通信距离为 45000-75000km，并在 2020 年与美国共同开展了 ALCOS 项目，利用搭载于 MQ-9 Reaper “死神”无人机上的轻量化、多谱段激光通信设备，实现了全球首次无人机-卫星多谱段激光通信，通信速率达到 1.8Gb/s，通信距离为 40000km；在空地海跨域通信方面，空客公司与荷兰 VDL 公司于 2021 年合作开展了 UltraAir 项目，利用光电融合高集成度激光/射频通信载荷实现了飞机与飞机、舰船、卫星间的大容量激光通信实验研制，通信速率达到 2.5Gb/s。

日本于 2012 年启动第二期为期十年的光电融合系统技术(PECST-II)项目，到 2022 年实现光电融合互连模块 10Tb/s 总带宽、1mW/Gb/s 的能量效率，并在 2022 年发布了单芯片 400Gb/s 带宽的超小型光收发引擎，面向紧凑型 AI 计算应用场景。NTT 公司在 2022 年通过共封装异质集成，实现了 1.2Tb/s 总带宽的相干光通信模块，其中驱动芯片在 CMOS 工艺下实现了 65GHz 以上带宽。

总体而言，通信领域的光电融合集成技术的发展具有以下四点趋势：一是超高速，典型通信速率由 Mb/s 量级提升至 Gb/s 甚至 Tb/s；二是多平台和网络化，推出搭载于卫星、高空侦察机、无人机、舰船等平台的、由激光通信链路构建的多类型、多层次全球化网络；三是多谱段融合，形成包括紫外、可见光、红外宽光谱融合通信和激光/微波射频融合的通信能力；四是多功能一体化，满足激光通信与激光测距、光学成像相结合，实现感、传、算一体。

4. 光电融合集成在国防领域的发展现状

未来社会对个体人而言，希望达到无所不知、无所不能、聪明睿智的状态；对国家而言，希望实现全球实时高精度侦查、信息传输处理高速顺畅、中央决策智能正确。要想实现上述状态，需要我国的信息体系具备空天地海多维信息探测能力、海量信息的传输与处理能力、超低功耗的载荷集成能力。但目前基于传统微波和电子技术，受限于带宽和电子瓶颈，难以满足未来信息社会的高精度探测、快响应处理和智能化决策的发展需求。

为了在不依赖摩尔定律的情况下继续推进电子器件性能的大幅提升，保持美国的领先地位，美国国防部高级研究计划局（DARPA）于 2017 年 6 月启动了“电子复兴计划”（ERI: Electronics Resurgence Initiative），被业界誉为将开启下一次电子革命。DARPA 提出的“电子复兴计划”是一个历时 5 年，总投资 15 亿美元的研究计划，是商业界、国防工业界、大学研究人员和国防部之间开展的一系列前瞻性合作项目，要求对微系统的材料、设计和架构等采用创新性的新方法开展研究。

5. 光电融合集成在计算领域的发展现状

光电融合集成在计算领域的应用主要集中在光电混合互连和光电协同计算两方面。

光电混合互连需求驱动在于能力型、容量型计算系统内网络传输带宽容量爆炸式增长，传输速率从 10Gbps 快速演进至 112Gbps 甚至 224Gbps。传统的电互连受限于物理特性机理，更高速率情形下损耗快速恶化，驱动距离急剧缩短，无法满足系统互连的需求。光通信从机柜间到板间，再到板内取代金属电缆或印制线成为互连通信主要载体。光互连下沉主要表现在光电转换从板沿（Board Edge）逐步到板上（On Board），从近封装（Near Package Optics, NPO）向共封装（Co-Package Optics, CPO）发展。从目前发展现状看，在器件层面上光电合封、光电单片混合集成的芯片基础是成熟的，已有光电合封原型系统演示，但光 IO 封装物理形态上尚不能满足高可靠和高便捷性需求，同时也受限散热和温控（大规模集成电路功耗通常较高），光电共封装在热可靠性上尚未获得系统集成商的认

可。大规模推广应用还有待于光 IO 封装形态设计、封装固定热稳定性及光器件性能温度稳定性上的突破。从灵活性和可靠性上考虑，未来 5 年光引擎的发展还是以 NPO 为主要应用载体。

在光电协同计算方面，随着硅基光电子集成、量子信息等技术快速发展，光计算技术有望成为满足人工智能高计算能力和低能耗迫切需求的可行路径之一。与传统电子计算技术相比，光计算技术具有高速、高带宽、低功耗、高并行度的优势，片上集成也取得了长足进展，但目前光计算还不够成熟，只在某些特定领域得到了有限应用，通用型光计算还未发展成一项成熟的实用技术。光计算面临数据来源开销大等现实挑战。由于光受限于光子的物理特性难以实现存储，数据在很长一段时期内还是只能储存于电子存储器件，而要施行光计算，需要先将数据从电子设备中转为光信号，计算完成后再将输出结果从光信号转回电信号以长期存储。这一对数据的电光/光电转换所产生的额外功耗相对较大。为此，目前光计算主要应用也多集中在输入数据本身就是光信号的机器视觉，以及信号原本就需要转换为光信号进行长距离传输的传感系统。从另一个角度看，也可以将光学操作的原理解读为一种形式的计算，即与处理数据记录的电子平台一起工作的预处理阶段或协处理单元。基于这一解读，可以让光学组件做尽可能多的工作，在协议层面打通光电数据交互瓶颈，利用光学计算物理特性和光电协同计算来优化整体计算系统延迟功耗需求。

光神经网络（Optical Neural Network，ONN）和光子回路为 AI 加速器应用与其它机器学习应用带来一次范式转换。推理任务（尤其是用于视觉计算应用的推理任务）已可使用全光学或光-电混合系统来很好地实现。在人工智能领域，卷积、傅立叶变换、随机投影和许多其它运算是 DNN 架构的基本构建模块，驱动着大多数现代视觉计算算法。同时这些运算也可以是光与物质交互或者光传播的副产物，线性光学元件能够近乎“免费”地完成上述计算。目前伴随光子片上集成技术的长足进展，ONN 正从空间光计算到光子芯片演进，以实现小型化、芯片化满足光电协同计算的需求。2017 年，美国麻省理工学院构建一种基于硅基马赫-曾德干涉仪光开关阵列（MZI）全光卷积架构，通过在纳米光子芯片上深度学习编程实现语音识别功能。芯片由 56 个可编程 MZI 和 213 个相移单元级联而成，设计 1×4 神经网络结构集成在毫米级硅基芯片上。MZI 光开关在平面内实

现光学全互连，通过调节电压实现 MZI 光开关分光比，可在芯片上加载可编程权重矩阵。2019 年，德国明斯特大学提出一种基于相变材料加级联微环结构的全光学神经网络芯片，可实现简单的英文字母识别。

“类脑”计算也是光计算一个重要发展方向。人脑由数百亿神经元高度互联构成，具有强大处理能力。实验显示生物大脑 1 秒钟处理计算量，超级计算机需处理 40 分钟才能完成。类脑光子芯片模拟人脑计算，通过光子携带信息在模拟大脑神经网络构架下处理数据，使芯片达到像人脑一样高速并行并且低功耗的计算。以微纳光子集成为基础的光子芯片结合基于光学计算的神经网络数据处理系统是应对未来低功耗、高速度、宽带宽、大数据量信息处理能力的关键。

6. 光电融合集成在智能感知领域的发展现状

随着 5G 通信、人工智能等现代技术的不断发展，基于光电融合技术的感知系统应用场景更加复杂，各类系统的异构性更加多样，信息交互方式不断丰富。在此背景下，针对不同场景的应用需求，不同系统的接口类型，不同信息的数据格式，迫切需要光电融合感知系统具有智能化、集成化的能力。近些年来，基于光电融合集成的智能感知系统已经得到了一定程度的发展，按照在系统中所处的位置不同，可分为智能光电融合前端、智能光电融合链路、智能光电融合处理三部分。

智能光电融合前端用于实现对信号的宽带收发和波束形成，其核心组成分别为智能化微波光子混频器与真延时阵列。微波光子混频的基本原理为：将射频信号变换到光域形成光载射频信号，利用高频、智能可调谐的光学本振对光载射频信号进行高质量混频。在微波光子混频方面，2018 年，意大利国家光电实验室 F. Scotti 等人利用锁模激光器产生光学本振，实现了 2-18 GHz 范围内可调谐的信号收发。基于真延时阵列的波束形成原理为：将射频信号变换到光域形成光载射频信号，利用光学真延时阵列对不同的光载射频信号引入不同群延时，经光电转换后实现具有特定空间指向的波束形成。在此方面，2018 年，美国俄亥俄州立大学 B. L. Anderson 等人基于光频梳和集成空间光器件，实现了 81 通道的真延时波束形成系统。

智能光电融合链路用于实现射频信号的高性能传输，涉及到波分复用与路由

交换、稳相传输等技术。波分复用技术是用于同时传输多组信息的关键技术。2019 年，日本国立信息与通信研究所 P. T. Dat 等人基于波分复用技术，实现了毫米波信号与 LTE-A 信号的同时传输。当涉及多组信息的智能路由与交换时，需要引入光开关阵列。2017 年，R. B. Priti 等人基于马赫曾德尔干涉仪，通过控制干涉仪的两臂相位差实现了 $N \times N$ 光开关阵列；同年，S. P. Wang 等人基于微环谐振器，通过温度控制对谐振器的谐振波长进行调节，实现不同通道的路径切换，并可通过级联形式进一步拓展阵列规模。光载射频信号在传输的过程中，由于链路存在机械、温度等非理想扰动，在接收端往往存在严重的相位抖动。在光载射频信号传输过程中，由于调制器的非线性功率传输函数等非理想因素存在，微波光子链路的动态范围将受到严重影响。2013 年，加拿大康考迪亚大学 R. Zhu 等人基于模拟预失真技术，实现了 $110 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 的无杂散动态范围；2014 年，加拿大渥太华大学 W. Li 等人基于偏振调制器和 Sagnac 环构建全光链路线性化系统，实现了 $121 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 的无杂散动态范围和大于 50dB 的三阶交调抑制。

智能光电融合处理用于实现宽带范围内信号的接收处理，光信道化技术和光子压缩感知技术是其中的典型技术。光信道化技术利用多个并行信道实现宽带范围内射频信号的接收，其核心在于信道化器的实现。基于灵活可调谐的微波光子滤波器，可以实现可重构信道化器，并在此基础上实现智能射频信号接收处理。另外，对于每个信道内接收到的射频信号，需要将其转换为数字信号并做进一步处理。压缩感知技术可在远小于奈奎斯特采样率的条件下得到信号的离散采样数据，并利用算法重建恢复出原始信号。

此外，在光电融合智能感知系统的集成化方面，硅光集成技术的飞速发展使得高性能器件及芯片得以实现，如 2013 年，F. Horst 等人采用级联 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 1×8 波分复用滤波器，并将级联 MZI 与延迟线相结合构建平顶 Nyquist-DWDM 滤波器，进一步优化滤波器滚降因子；2019 年，D. J. Liu 等人采用弯曲定向耦合器，成功研制了带宽高达 140nm 的新型 MZI 光开关，可在此基础上实现大规模 $N \times N$ 光开关阵列及应用；2017 年，D. Perez 等人提出了一种基于六边形 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。未来，借助灵活强大的人工智能技术与光电集成技术，基于光电融合集成的

智能感知系统有望实现与环境、用户的实时交互，在智能化场景中发挥愈加重要的作用。

四、 我国发展现状

1. 我国在光电融合集成方面的战略布局

我国的国家重点研发计划已推出“光电子与微电子器件与集成”以及“信息光子技术”专项，为多材料体系的光子集成，多维度调控的光子集成芯片，多功能集成的光电混合集成计算系统等提供了资助。目前光电融合集成技术的发展整体还处于起步阶段，在材料、仿真工具、核心工艺与流片平台、晶圆级表征手段、集成方案等诸多方面仍需要关键技术突破。

2. 我国工艺技术发展现状

在我国，尽管尚未有类似于 Intel、格罗方德的平台，但在国家和地方多年支持下，全国总体上也形成了比较完整的制造加工平台和工艺能力。从运行模式和工艺能力来看，主要有三大类：

(1)基于电子束直写的高校科研实验类微纳加工平台。此类平台总体类似，投入规模约为 1-2 亿元，运行上比较传统，工艺能力标准化较低，制备工艺的稳定性和重复性较差。但特点是灵活性很强，因而有利于探索新材料、新工艺与新结构，而且器件开发周期较短。国内相关单位包括：半导体所、浙江大学、上海交大、华中科技大学、西北工业大学、中山大学、西湖大学等。此类平台一般是面向无源器件，通常配备电子束光刻（配备紫外光刻）、ICP 干法刻蚀、PECVD 薄膜沉积等核心设备。其中，电子束曝光设备主要有 30kV、50kV、100kV 等几种规格，其差异在于电子束直写速度及精细度等特性。此类平台原则上可用于硅、SiN、铌酸锂等材料体系光子集成器件的制备，目前绝大多数都具备硅光波导及无源器件的制备能力，也有少量的平台具备 SiN、铌酸锂光波导的制备（如中山大学、浙江大学）。目前，各平台工艺水平差异较大。以研制的硅光波导为例，其损耗通常为 1-3dB/cm，主要决定于各个平台涉及的光刻工艺、刻蚀工艺等。值得注意的是，采用电子束光刻工艺，无需高精细掩膜板，可实现 10-100nm 等精细结构的制备，但往往存在写场较小（100-1000 微米）等问题，因此适合于小尺寸单元器件的制备和原理性验证（特别是具有亚波长结构的硅光无源器件），难

以满足大规模集成的发展需求。

(2) 基于电子束直写的商业运作性微纳加工平台。此类平台投入规模 2-5 亿元，但设备类型与第一类类似，主要是电子束光刻（配备紫外光刻）、ICP 干法刻蚀、PECVD 薄膜沉积等核心设备。但其整体运行配备有专门的工程师队伍，设备专用性更强、覆盖更全面，工艺稳定性更佳，同时配备的电子束直写设备性能更好，因此在加工能力上相比于第一类有较为明显的优势，对于研发具有精细结构的新型光子器件具有较好的支撑作用。此类平台主要代表包括：天津华慧芯、南京南智光电、苏州纳米所等，可提供用于硅、SiN、铌酸锂等材料体系光子集成器件制备的服务。中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米加工平台拥有超净实验室 10000 m²，建有外延生长、光刻、刻蚀、化学气相沉积、物理气相沉积、离子注入、器件封装等全套工艺设备，具备微纳电子器件、微机电系统、光电子器件等研发制造能力，其步进式光刻机最高分辨率为 350 nm、其电子束光刻机为 50 kV，但并不直接提供硅光器件标准制造工艺。华慧芯作为天津市立项支持的省部级中试平台，拥有百余人技术团队、1500 m² 超净实验室及 18000 m² 的产业化基地，具备电子束曝光机（EBL）、紫外光刻机、反应离子刻蚀等设备，具备 SOI、薄膜铌酸锂（LNOI）、氮化硅（SiN）等多种材料体系的微纳工艺能力，但尚不具备离子注入掺杂、锗外延等有源硅光工艺能力。其 EBL 设备，最高电压为 100 kV，最大写场面积为 1 mm×1 mm。代表性加工能力为：SOI 光波导最小特征尺寸为 60 nm，单模波导传输损耗为 2 dB/cm。相比深紫外步进式光刻流片，其工艺步骤可灵活定制，且交付周期较短。

(3) 基于 DUV 光刻的晶圆级流片平台。此类平台和比利时 IMEC、新加坡 AMF 等类似，由于建有半导体掺杂、外延等设备，具有全套硅光器件制造能力，包括无源及有源（如调制及探测）等，国内比较有代表的是中科院微电子所、重庆 CUMEC、上海工研院。目前，三家单位均可提供 Si/SiN 8 寸晶圆流片服务，均具有 180nm 加工能力，CUMEC 可提供 130nm 加工服务。上海工研院提供 2 套硅光工艺，包括 90nm SOI 有源/无源工艺与 180nm SiN 无源工艺，具备三步硅刻蚀、多步有源器件掺杂、锗外延、TiN 金属加热电极、双层铝互连和深硅刻蚀等关键工艺能力，可支撑各种硅光无源/有源器件的研制。表 1 列出了这三个平台的代表性指标，可见各平台的加工能力存在较大差异。更重要的是，各平台加

工稳定性/重复性更是不同。特别不足的地方在于，加工周期总体偏长甚至过长，例如有源流片甚至需要 1 年才能完成、无源流片也往往需要 4-6 个月，难以满足国内光电融合集成发展的迫切需要。因此，其加工能力亟需持续提升。

表 1. CUMEC、微电子所、上海工研院平台代表性指标.

	CUMEC	微电子所平台	上海工研院
工艺线	180nm-Si 180nm-SiN	180nm-Si 180nm-SiN	90nm-Si 180nm-SiN
硅光波导（条型）损耗	1.5 dB/cm	2.5 dB/cm	2 dB/cm
硅光波导（脊型）损耗	1.0 dB/cm	1.5 dB/cm	/
SiN 光波导（条型）损耗	<0.1dB/cm（厚度 800 nm）	0.5dB/cm（厚度 250nm）	0.15dB/cm（厚度 400nm）
锗硅探测器暗电流	<10nA @ -1V	100 nA @ -1V	<30nA @ -1V
掺杂	B, P	B, P	B, P

此外，薄膜铌酸锂平台是近年来新兴的平台，国内制造能力发展较快，处于世界前列，在此专门总结一下。在光学级薄膜铌酸锂晶圆方面，济南晶正和上海新硅聚合是该领域全球领先的企业，已形成系列化产品，薄膜厚度（200-900nm）、衬底材料（石英、硅、蓝宝石）选择多样，供货稳定。

在薄膜铌酸锂集成光子芯片方面，浙江大学、中山大学、山东大学、华东师范大学、上海交通大学、清华大学、香港城市大学等是国内较早开展相关研究的单位，都在各自的加工平台上，开发了独特的工艺。此外，广州铌奥光电子、天津华慧芯、南京南智光电等企业，也对外提供薄膜铌酸锂光子芯片流片服务。而薄膜铌酸锂光子芯片的制作工艺关键在于刻蚀和图形产生。

在刻蚀方面，通常采用 ICP 干法刻蚀。浙江大学、中山大学、香港城市大学以及前述的各个企业都采用此工艺。ICP 刻蚀是微纳加工标准工艺，加工质量稳定、效率高，其波导传输损耗可稳定达到 0.1dB/cm。但由于铌酸锂材料本身的化学稳定性，干法刻蚀多采用溅射刻蚀的方式，制作的铌酸锂波导具有一定的侧壁

倾角（60-70 度）。天津华慧芯制造的 LNOI 波导最小特征尺寸为 150 nm，单模波导传输损耗为 0.5 dB/cm，侧壁倾角为 50°-60°（软掩模）或 70°-80°（硬掩模）。清华大学最近开发了基于湿法腐蚀的铌酸锂结构制作工艺，利用湿法腐蚀的晶面相关性，可实现侧壁垂直的波导形貌，其传输损耗可达 0.04dB/cm，但并不适合复杂光子芯片的制作。华东师范大学开发了基于 CMP 的铌酸锂刻蚀工艺，可制作侧壁光滑的铌酸锂波导，波导损耗达 0.027dB/cm，但侧壁倾角过大，限制了芯片集成度。

在图形产生方面，国内外最早采用的仍然是电子束光刻。该技术可稳定地制作最小尺寸为 100nm 的结构。目前，浙江大学、中山大学、天津华慧芯、南京南智光电等多家高校和研究所平台均采用该技术。最近，香港城市大学、广州铌奥光电子等也开发了基于 DUV 光刻的铌酸锂芯片制作工艺，可实现 4-6 寸晶圆级流片，支持的铌酸锂结构最小线宽为 220nm 左右，适合于大批量制作调制器、非线性器件等传统光波导器件的研制。

3. 我国系统与应用发展现状

我国在面向通信应用的光电融合集成技术研究起步较晚，总体与国外相比尚有一定的差距，但近年来我国在该领域发展迅猛，在部分系统指标上达到了国际先进水平：在短距光互连方面，国家信息光电子创新中心在国内率先实现了 100G-400G 系列硅光相干和数通收发芯片产业化大规模应用，打破国外垄断。研制出国际首款硅基铌酸锂薄膜相干光调制器和硅基石墨烯相干光接收机，发布首款 1.6Tb/s 硅光互连芯片和 1.4T 硅光相干收发芯片，在硅光调制器芯片和探测器芯片上，多次刷新国内和国际记录；在星间、星地通信方面，2019 年，航天 504 所实现了实践二十星地激光通信，最高通信速率 10Gpbs，通信距离 40000km；在空地海跨域通信方面，中国电科 34 所于 2021 年 9 月在“鸿鹄”专项任务中实现了平流层气球-地面激光通信，通信速率达 2.5Gb/s、通信距离 67km，载荷重量达 23kg；在水下光通信领域，西安光机所、上海光机所、武汉六博光电起步较早，研制了工程样机并在诸如深海勇士号、机-潜跨介质通信等领域展开了应用研究，可以实现百米量级的水下高速信息传输；在无人平台通信方面，中国电科 34 所于 2023 年 6 月实现了两架多旋翼无人机间的激光通信，通信速率为 1.25Gb/s、

通信距离达 30km，载荷重量为 15kg。

在光计算方面，在国家和地方政府政策扶持下，我国光计算产业发展势头迅猛，初步形成了贯通“设计-制造-样品”的产业链条。光计算芯片在设计、加工、封测等技术方向都得到充分重视和发展，具备一定的光计算基础理论和实施经验。在光计算领域，我国与美西方发达国家同时起步，处于并跑水平，国内高校科研单位和企业已掌握多项自主可控核心技术，在光计算的设计、制备、封测等方面已经形成多款研究型产品，并发布了多款光计算原型产品。然而，我国光计算领域研发仍处于初级阶段：（1）在核心器件仿真设计方面，部分核心器件已能够依托国内软件完成仿真设计，但新结构、新机理、新材料等器件结构仿真无法在国产化的软件平台上实现，光电子芯片与微电子芯片仍然需要单独设计，未打通光电子与微电子的联合仿真。12 英寸 65nm 的光电融合产线已完成试运行，但批量化制备工艺不过关，制备工艺不稳定、芯片指标低、流片周期长等问题与国外相比仍然存在较大差距。（2）在光计算芯片封测方面，国内已有实现小规模的光计算芯片封测的商业化运行的公司，但在性能、周期、先进封装工艺等方面与国外仍存在一定的差距。（3）在工艺平台开发方面，国内已实现 8 英寸硅光平台的建设与对外流片服务。我国已经初步掌握智能算法的光电加速芯片与系统产业化攻关的能力，中国科学院半导体研究所提出了时序光子卷积神经网络，研制了多模干涉超高集成度卷积处理器，算力密度实验上达到 $12.74\text{T MACs/s/mm}^2$ ，理论可达到 1.19P MACs/s/mm^2 ，达到国际最高水平。清华大学提出了一款名为 ACCEL 的光电融合芯片，该芯片的系统级算力和能效，实测达到高性能工业级 GPU 的 3000 余倍，能效的 4000000 余倍；提出了基于亚波长结构的集成衍射光子神经网络，计算吞吐量可达 $1.38 \times 10^4\text{TOPS}$ ，芯片算力密度可达 10^{16}FLOPS/mm^2 ，能量消耗约为 10^{-17}J/FLOP 。华中科技大学和北京邮电大学在波分复用光计算领域率先实现了单通道 3×3 卷积、 4×4 矩阵乘法，展示了图像卷积，矩阵变换应用。北京大学提出了卷积神经网络（CNN）的多功能逻辑运算的全光计算新策略，皮秒运算速度、 10fJ/bit 级超低能耗。上海理工大学、上海交通大学、湖南大学、华中科技大学、西安电子科技大学等针对超构表面、脉冲神经网络的创新研究取得了一定突破。上海曦智科技有限公司等初创企业，开展了针对智能算法的光电加速芯片与系统产业化攻关，上海曦智科技有限公司的数据处理通量达到 69Gbps，

光子算术的 40 节点/25G 主频光计算芯片具备 102.4TOPS 的算力，已有小规模商业应用。

五、 发展布局建议

1. 总体任务建议

在光电融合集成领域关键科学和技术问题的攻关上，提出以下总体任务建议：

（1）打破单一材料体系的限制，利用硅、Ⅲ-V族、有机、铌酸锂等已有的材料进行光电集成，同时开发新的材料，探究新的材料机理，针对不同材料的属性，提高集成芯片的综合性能，如利用异质异构集成解决困扰硅基材料体系的发光问题；

（2）打破材料维度限制，面向多维材料结构进行光电融合，从典型的 0D 材料——量子点、纳米晶到 1D 材料——量子线、碳纳米管、2D 材料——量子阱、石墨烯，延伸到 3D 材料——硅、光子晶体，从多角度、多维度材料出发，纵向论证光电融合调控机制；

（3）打破调控维度限制，从幅度、偏振、频率、时间、相位、空间等多维度物理角度调控与参数利用，在最大程度上提高调制带宽，提高芯片传输速率，扩大传输容量；

（4）面向光电融合的芯片制造及封装测试技术，开发光电一体化仿真平台，利用人工智能设计微波阻抗与光波模场的匹配，避免阻抗变换和模场变换过程中的信号反射和损耗，提高效能。实现引线键合、植球焊接、TSV 等混合集成技术的自动化设计；

（5）高效开发和利用各个频段的资源，在微波、毫米波、太赫兹波、光波红外、可见、紫外等多频段实现光谱响应。通过科学开发利用，增强我国的频谱资源储备，缓解频谱容量的供需压力，为我国光电融合的长期发展提供丰富的频谱资源；

（6）打破功能限制，突破芯片只能完成单一功能的局限性。提高单片光电集成芯片在信息产生、获取、传输、存储、显示、放大、处理等功能的兼备能力，完成多功能的片上系统集成；

（7）能量光电子和信息光电子融合，发展单光子探测技术，以实现超高灵敏信息感知与处理能力，面向瓦级发射功率高速光发射技术，实现数万公里超长

距离信息传输。

2. 集成芯片级任务建议

1) 硅基光电集成芯片

在过去几十年里,硅基光电集成技术的研究波段主要集中在 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$, 并依托硅基成熟、高精度加工工艺技术在这些波段可实现高密度波分复用。随着波长信道密度的持续提升,信道间的串扰逐渐增大,硅基芯片所应用的工作波长正逐步向 $2\mu\text{m}\sim 8.3\mu\text{m}$ 波段拓展,这一波段在硅基芯片中也具有较低的吸收损耗,同时在气体传感、生物医学等领域具有广阔的应用前景,因此,加大硅基光电子集成芯片技术在中红外波段研究与应用的投入将成为未来工作的重点。

同时,应偏重能够与 CMOS 工艺兼容的硅基发光材料和器件的研制,特别是新型硅基光源材料的研发。此外,针对未来硅光电探测技术的研究,应关注以下几个方面:第一,提高对探测器的暗电流控制和灵敏度;第二,突破探测器的带宽限制;第三,探测效率的提升及波长范围的扩展。通过创新器件关键工艺和材料结构,能带调控和新材料的结合,改善暗电流特性,提升探测器在宽光谱波段内的吸收效率,全面优化探测器性能。一旦硅基发光器件和探测器件的性能出现突破,将实现深度的硅基光电融合以及光电子与微电子混合集成芯片的大规模成熟商用。

2) 光电融合超大规模集成芯片

长远来看,希望能够在同一种集成材料体系或同一晶圆采用标准制备工艺实现光发射、传输、放大、探测、处理多种功能一体化以及配套驱动和控制电路的光电融合集成。光电融合与集成的发展需要材料、设计、工艺、芯片、封装、系统应用的全链条体系化的多方面融合。

(1) 在材料体系方面,多材料的异质兼容集成是需要迫切解决的基础性问题,其中硅基发光和放大补偿是重中之重。(2) 在光电融合设计方面,需要逐步完善光电融合与调控基础理论,建立光电融合设计集成环境,开发应用于物理仿真、器件模型、链路仿真、版图设计与验证等设计全流程的专用工具,形成新的

设计方法。结合国内工艺平台，开发面向设计自动化的光电融合元件库，建立自主可控的集成光电子设计生态。(3)在工艺融合方面，需要充分利用成熟的 CMOS 平台，开发适合不同尺寸的光电子和微电子融合集成的芯片制备工艺，形成工艺固化与工艺标准化技术和元件库，搭建稳定运行的融合集成工艺技术平台。(4)在光电融合封装方面，通过在高性能集成电封装模块内集成光接口的方式来大幅提升带宽和吞吐量、降低能耗，发展兼容微电子测试流程的光电子封装测试技术，特别是面向规模化制造的晶圆级内建自测试技术和检测流程，建立光电一体化芯片检测体系和标准，解决光电芯片协同设计、封装工艺整合及功耗散热等问题。(5)在光电融合与集成应用方面，需要推动多频段、多维度、多材料、多功能的光电融合与集成技术，实现超高速和超低功耗的智能化芯片与模块研发，突破光电子技术的信息传输、感知、处理一体化瓶颈，实现在超大容量光通信系统、5G/B5G 系统、高性能光计算、光电传感网络等领域的大规模应用。

3) 微波光子芯片

集成微波光子技术致力于研发宽带微波光子信号产生、传输、处理、接收的核心光电芯片与集成模块，提供小尺寸、低功耗、阵列化以及快速可重构智能化的微波光子系统实施方案，是微波光子学走向全面实用化与产业化的关键，也将成为下一代空天地信息一体化网络、未来宽带无线接入网以及雷达、电子对抗系统等应用的核心技术。

(1)在微波光子有源核心器件方面，激光器、调制器和探测器等有源器件是微波光子系统中的核心器件，决定着系统的关键性能指标。目前国内自主制备的微波光子有源器件带宽在 20GHz 以下，而国际先进水平已高达 40GHz，为此，我们应建立针对先进材料体系和我国工艺短板的加工平台。争取在核心光电器件的自主研发与制备上取得重大突破。(2)在微波光子阵列化器件方面，随着微波光子系统的功能日益增加，系统单片集成所需要的单元器件数量也持续增加，如何实现器件的高性能阵列化是一个关键的技术突破。先进的阵列化设计和封装可以显著提高系统的稳定性和灵敏度，提高线性范围，以及减小体积和降低功耗噪声等，是未来的重要发展方向。(3)微波光子芯片仿真设计和封测方面，需要发展新方法、新模型和新架构，以及研发自主产权的光电融合仿真设计软件。未来

研究重点需放在以Ⅲ-V族和硅基材料为基础的光电联合仿真理论与版图绘制软件开发，组织国内高校和研究所设计高性能的器件 PDK 库。此外，还需搭建和培训芯片仿真与版图设计平台，实现光电子设计智能化全链条仿真能力。最后，对微波光子集成芯片封装测试平台的发展需鼓励相关研究所、企业研究和发展的倒装焊技术、多维度封装技术等，降低封装寄生效应，突破模拟高频封装、高速光电一体化封装的技术瓶颈。最终实现一个完整的微波光子生态系统，为我国微波光子芯片级产业应用提供高性能器件与模块。

4) 光子智能芯片

在光子人工神经网络方面，突破光电融合一体化技术，实现单片集成的大规模阵列化光计算芯片的研发制备，其集成度和计算速率会有质的提升。在一些特定情况下的计算中，已经可以利用大规模的光学网络直接在光域完成计算，计算速度已经遥遥领先传统微电子芯片，系统中的电学控制模块仅调节网络偏置电压，实现了真正意义上的全光智能神经网络。该阶段已经充分发挥了光计算的优势，下一步是开发更多的应用场景，全力推动光子神经网络芯片的产业化与实用化。随着光电融合集成技术的成熟，其光子神经网络的规模和计算速度都会有大幅度的提升，可以开发更多可重构的神经网络功能，实现光子神经网络可重构开发平台，为光子人工神经网络的进一步发展提供更大的灵活性和适应性。

3. 系统与应用任务建议

1) 感算一体的高精度多维感知成像技术

全球目标动静多样、环境变化复杂，为了满足全球实时态势感知的国家战略需求，迫切需要微波、红外、可见光、太赫兹等多谱段以及强度、相位、偏振、光谱等多参量的多维感知探测融合技术，使得信息传输处理容量巨大，基于现有的探测与通信处理技术方案难以支撑我国全球态势实时感知能力的实现。迫切需要采用光电融合集成技术手段结合多元融合探测成像、多维度信号处理、智能控制信息处理与目标识别等技术，开展感存算一体研究的光电融合集成技术，突破“光感、磁存、电算”一体机理、信息处理算法、一体化电路和架构、异构集成

工艺等关键技术，大幅度提升精确感知的能力，并缓解对骨干通信链路和中央处理的压力，可广泛应用于无人机蜂群、无人战车、小卫星集群、水下无人潜航器等空天地海网络化平台，为实现全球侦查的战略目标提供核心技术支撑。

2) 永不掉链的空间激光骨干通信组网技术

目前激光通信系统大多采用机械转动方式实现“点对点”的单目标运动区域覆盖，激光通信存在易掉链，对准难等问题，难以有效进行多终端之间的快速接入和组网应用，通信速率较低，生存能力弱。基于光学相控阵技术的超高速多目标空间激光通信系统，采用光学相控阵多址接入、高功率空间激光发射、多载波复用、超高速自适应空间激光解调、硅基集成相干接收等关键技术，可实现控制一束或多束高强度激光的空域扫描，使得组网、性能、质量等大幅提升，形成高通量高效协同的多个稳定空间激光骨干链路，满足跨域乃至全域作战的通信需求，为大型星链的高效组网提供核心技术支撑，实现对敌打击决策自主化和方式多维化。

3) 超大容量超低功耗光通信芯片与模块

光电融合集成有望结合光电子与微电子技术 in 超高频、高效率等方面的优势，突破现有速率与能耗瓶颈。通过突破超大带宽光电调制与探测器件的设计、制备、封装与测量，实现带宽突破 200GHz 的核心光通信器件的自主可控。通过研究超高频大功率高效电驱动与放大芯片的设计、制备、封装与测量，实现微电子芯片与高速光通信器件的融合。通过系统研究超高频、超强场、纳米尺度下载流子输运机理与行为规律，探索新原理、高性能光电融合器件。

4) 多芯粒光计算/传感系统

面向智能感知、智能计算的多功能光电融合系统有望在规模、算力、能效、功能方面实现突破。开发基于不同功能芯粒异构封装与集成技术，实现突破单个芯片制程、良率、复杂度、尺寸、成本限制的高性能计算与传感系统，推动其在人工智能推理应用、自动驾驶、物联网等领域的应用。

5) 共封装集成与高速片间互连

随着数据中心内部流量的持续快速增长，交换机容量与端口密度、接口速率面临严峻挑战。直接把光收发模块与电交换芯片在同一个衬底上封装成一个芯片的光电融合共封装方案，省去很多的 SerDes 功能，预计能将能耗降低 30%-80%。通过突破高速光电调制探测器件，开发 800G+光引擎芯片，并研究其与交换机芯片的共封装集成有望实现面向数据中心的下一代高性能低功耗交换机。此外，利用光电融合集成芯片实现的光 I/O 技术能实现片间高效光互连，提供超高带宽密度、超低延迟和系统能效的显著提升。通过突破光 I/O 芯片的核心工艺开发，以及其与 CPU/GPU/HBM 等芯片的新型封装工艺，实现计算、存储等芯片间的高效互连，构建高性能计算系统。

6) 光电融合集成的工艺平台技术

目前不同光电子器件没有统一的规范和标准，传统光子、射频、微电子芯片之间的尺寸往往存在 1-2 个量级的差异，为实现性能最优化，各种元器件采用了不同的结构和材料体系，目前光子链路、射频电路以及控制驱动电路等部分多为单独设计且独立分置，具有光子技术宽带高速特性和电子技术精细灵活优势的光电系统架构复杂度高且难以集成，体积、重量、功耗难以降低，大多基于分立器件验证其功能，系统功能扩展性差。无法满足小型化、低功耗、高可靠的需求。因此，需要通过研究微电子-光电子融合集成工艺的物理基础，解决跨波长、跨材料、跨尺度的结构差异导致的系统整体控制技术瓶颈，探索面向光电融合集成的新原理和新技术，实现一体化协同的新架构的光电融合集成。

六、 资助机制与政策建议

1. 建议启动国家自然科学基金委“光电融合集成重大研究计划”，加强光电融合集成的体系化研究

在重大研究计划的牵引下，从器件到芯片、系统建立完整的光电融合理论体系，突破一系列光路与电路协同仿真设计技术，推进标准化、智能化和自动化仿真设计工具。瞄准光通信/光互联、光计算、光传感、光测量等应用需求，重点研究超高速光收发和复用、光信号智能化识别及自动化调控均匀等技术，围绕CMOS兼容工艺，面向大规模、可量产的路径进行布局。

2. 加强光电融合集成工艺研发投入，健全产业上下游生态链

光电集成电路发展的难点在于设备和工艺条件的局限性，制作光电融合芯片需要新的制作工艺，而国内公司尚无法实现光电全集成芯片的加工。建议加大中央财政资金投入，加快基础和技术创新，协同国内光电子与微电子优势单位，统筹产业上下游，分阶段部署重大项目，攻关光电融合集成核心工艺技术。

3. 建立光电融合集成设计和制备技术标准化体系，为一体化协同的光电融合集成技术凝聚力量

目前各种光电子器件没有统一的规范和标准，而传统光子、射频、微电子芯片之间的尺寸往往存在1-2个量级的差异，且各元器件采用不同结构和材料来达到性能优化。建议深度协同与定制化光电融合集成中的光路和电路，建立光电融合集成芯片公益性工艺加工平台，为光电融合芯片新工艺研发和生产提供技术支撑与服务，并整合产业中分散的研发力量，完善创新体系与产业生态环境，增强产业群体国际话语权。