

# 第三届光电子集成芯片立强论坛专题纪要

## 目录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 专题 1: 前沿光电子器件及集成.....     | 2  |
| 专题 2: 光电子与微电子集成工艺技术.....  | 5  |
| 专题 3: 光电子与微电子融合仿真与设计..... | 8  |
| 专题 4: 光电子集成芯片封装与测试.....   | 11 |
| 专题 5: 光传输与数据中心应用.....     | 14 |
| 专题 6: 可见光通信.....          | 16 |
| 专题 7: 空间激光通信.....         | 19 |
| 专题 8: 智能光计算.....          | 21 |
| 专题 9: 光量子器件与系统.....       | 23 |
| 专题 10: 多维光存储.....         | 26 |
| 专题 11: 光显示.....           | 29 |
| 专题 12: 光成像.....           | 32 |
| 专题 13: 微波光子集成.....        | 35 |
| 专题 14: 激光雷达芯片.....        | 38 |
| 专题 15: 光传感.....           | 41 |
| 圆桌论坛: 大规模集成芯片: 光电融合.....  | 43 |
| 审查专家 (音序).....            | 45 |

# 专题 1：前沿光电子器件及集成

苏翼凯（上海交通大学）、戴道铤（浙江大学）、马仁敏（北京大学）

## 1. 专题简介

光电子器件及集成是将功能化的光电材料和微纳结构集成在单一芯片上，是光传输、光与无线融合、光传感和光计算等领域的关键环节，是信息光电子发展的一次里程碑式变革，在通信、传感、计算、生物、医药、能源、农业等领域具有广泛的应用前景。十三五期间，随着大数据、云计算、第 5 代移动通信、物联网以及人工智能等应用市场的快速发展，汽车、能源、通信等垂直行业对光电子器件产品与服务的需求进一步扩大，行业市场规模继续保持快速增长，2017 年达到 8028 亿美元，行业复合增长率达到 10.8%。预计 2024 年行业市场规模将突破万亿。目前光电子器件的带宽、能耗和容量问题仍然没有得到有效的解决，低功耗、高速率、高可靠、小体积等性能需求驱动着光电子器件的研究不断向前发展。

本专题针对前沿光电子器件的关键技术和集成芯片进行了交流，一共有 13 篇报告，含 8 篇特邀报告。上半场包括：Non-Hermitian photonics: new functionality by symmetry, new opportunity beyond symmetry (冯亮, 美国宾夕法尼亚大学)、硅基片上大角度扫描光学相控阵 (时尧成, 浙江大学)、全域米散射理论 (刘伟, 国防科技大学)、超材料辅助片上光场调控 (郭旭涵, 上海交通大学)、Broadband graphene-silicon hetero-integrated photodetectors (徐杨, 浙江大学)。下半场包括：薄膜铌酸锂光子集成芯片 (夏金松, 华中科技大学)、面向健康检测的超灵敏高特异性光传感芯片研究 (张晗, 深圳大学)、忆阻发光天线 (张顺平, 武汉大学)、合成维度空间片上光子器件研究 (张旭霖, 吉林大学)、Highly efficient on-chip mode conversion based on adjoint shape optimization (杨子荣, 宁波大学)、Advanced semiconductor laser sources enabled by photonics integration (王瑞军, 中山大学)、Circular cross-section waveguides and 3D devices processed by multi-foci-shaped femtosecond pulses (李泽政, 吉林大学)、Applications of thick silicon nitride photonic integrated circuits (Can Yao, Ligentec Sa, Switzerland)。

## 2. 主要观点

- 1) 得益于高性能和与 CMOS 兼容的加工工艺，硅基光电子的发展最受瞩目，国内外政府和研究机构对此持续大力投入。硅基光电子产业链不断完善，技术标准相继形成，已逐渐从学

术研究转变为市场驱动的良好循环。

- 2) 在通信领域，已基本建立了面向数据中心、光纤传输、5G 承载网、光接入等市场的一系列硅基光电子集成芯片解决方案。根据行业调查机构的预测，全球硅光模块市场将在 2026 年达到近 80 亿美元，有望占到一半的市场份额。
- 3) 在传感领域，MIT、Voyant Photonics 等多家研究机构推出了基于硅基光学相控阵 (OPA) 芯片的全固态激光雷达 (LiDAR)，具有集成度高、扫描速度快、体积小、成本低等优势，成为下一代激光雷达的重要革新。
- 4) 在人工智能 (AI) 领域，研究显示光神经网络芯片比传统电子计算机有两个数量级的速度提升，且功耗可降低三个数量级，而硅光神经网络运算芯片可实现 AI 处理器芯片所需的高通量和大规模矩阵运算。
- 5) 在量子技术上，硅基光量子芯片已经集成了数百个光量子器件，实现了高维度、高精度、高稳定性和可编程的量子纠缠、量子操控、量子传输和量子测量。
- 6) 在新型微处理器技术上，美国 DARPA、MIT, Intel、Ayar Labs 等机构正在致力于实现硅光芯片与高性能微电子芯片的光电融合，并已验证了集成硅光 I/O 芯片的新一代 FPGA、CPU 和 ASIC 芯片，预计可将吞吐速率提升 100 倍，能耗降低至 1/10，这为“超越摩尔”开辟了新路径。
- 7) 新材料和新的物理机理，为下一代高性能光电子器件的发展提供了一个弯道超车的机会。例如片上超材料能够实现亚波长尺度的电磁场调控，从而获取更大带宽、更低损耗和更大容量。同时通过不同材料体系和硅基混合集成，有助于突破传统硅材料器件的能效瓶颈。
- 8) 集成化和规模化是光电子芯片发展的必由之路。为了支撑信息传输、交换及处理的复杂化和智能化需求，规模化的光电子集成功能模块必须具备可重构的能力，在对系统性能没有影响的情况下完成所需光维度（例如波长、偏振、频段等）的可编程、可重构和智能化。
- 9) 通信市场需要带宽的高速增长，核心光网络系统需要越来越多的光信号多维度复用（波长、偏振、模式、轨道角动量等）。针对汽车的激光雷达，亟需实现更低成本和更高性能，包括硅基激光器、光学相控阵等。针对健康检测，需要研发超灵敏高特异性的光传感芯片和可传感的硅光波导结构。

### 3. 发展建议

- 1) 在基础前沿方面，针对未来面临的体积、功耗、容量等瓶颈问题，建议加大基于新的材料和物理机制的光电子器件研究，包括：片上介质超材料的精细光场调控；高鲁棒性非厄米

和拓扑片上光电子器件；

- 2) 对于性能指标和市场需求较大的光电子器件，加强产学研合作，协同研发，快速形成从基础研究到产业化的中试试验验证能力，并着力推广到市场，形成规模效应。建议的特定领域包括：硅基集成片上相控阵技术；
- 3) 硅基光电子单片/混合集成和光电融合是实现智能化和规模化的必由之路，能够从传统的通信，计算和传感过渡到更复杂的信息社会所需的智能化功能芯片，实现诸如类脑光计算、激光雷达、生物医疗等需求，需要国内研究所、高校和产业界等多方协作和创新开拓。建议的特定领域包括：片上薄膜铌酸锂高速调制器技术；片上波导出光的单片集成硅基激光器技术，先进的光电融合技术以及3D混合集成封装技术，实现真正意义上的 system-on-chip。

## 专题 2：光电子与微电子集成工艺技术

余明斌（中科院上海微系统所）、冯俊波（联合微电子中心）、张宝顺（中科院苏州纳米所）

### 1. 专题简介

从材料体系上，光子集成可分为以 InP 为衬底的 III-V 族光子集成和以 SOI 为衬底的硅光集成。III-V 族光子集成芯片的最大优势是可以单片集成所有的功能，并且可以利用成熟的有源器件技术。国际上的领军企业力推 InP 基光子集成芯片，单载波 400Gb/s 的光子集成芯片已经商用，单载波 800Gb/s 和 1.2Tb/s 的光子集成芯片技术正在逐步成熟。硅光集成技术与 CMOS 工艺兼容，易于高密度大规模集成，近年来获得了迅速发展，市场年增 40% 以上，几年内将超越 InP 成为主流。硅光集成在使能更大带宽和推动光电融合方面更具优势，但存在异质集成光源和加工精度等问题。

本专题共计 8 篇报告，根据平台的特点定位及材料的应用场景介绍了各自的能力，展示了在具体应用场景下所涉及的关键技术研究和产业化进展。报告主题为：Heterogenous integration of chalcogenide photonic devices on silicon (Wei Shi, Laval University, Canada)、The Status of Si-photonics industrialization and progress in AMF as foundry (Patrick Lo, AMF, Singapore)、应用于集成光子学的铌酸锂单晶薄膜 (胡卉, 山东大学)、硅光子技术的产业化路径和生态构建 (李淼峰, 阿里巴巴)、磷化铟基光子集成器件及平台 (陆丹, 中科院半导体研究所)、PLC 光子集成技术研究及平台建设 (尹小杰, 仕佳光子)、国内硅光电子集成技术和平台介绍 (余明斌, 中科院上海微系统所)、激光器协同设计与制造 (赵昀松, 海信宽带多媒体)

### 2. 主要观点

- 1) 光芯片工艺流程主要包括芯片设计、外延生长、晶圆制造等环节，从材料上主要分为硅 (SOI)、二氧化硅 PLC、氮/氧化硅、InP、LiNbO<sub>3</sub>、聚合物等。相比于大规模集成电路已形成的高度产业链分工，光芯片行业尚未形成成熟的设计-代工-封测产业链。海外头部光芯片厂商如 II-IV、Lumentum 等多采用 IDM 模式，主要系光电子器件遵循特色工艺，竞争能力更加综合，包括工艺、产品、服务、平台等多个维度。光芯片技术门槛高、产品线难以标准化。
- 2) 在硅光芯片加工平台方面，全球硅光中试到量产平台逐步形成。全球共有硅光制造工艺平

台 30 余家，主要集中在北美、西欧和东亚地区：北美地区代表为美国 AIM Photonics，拥有多条高水平硅光工艺线，具备从硅光芯片设计培训到制造封装的全流程能力；西欧地区代表为比利时 IMEC，是国际上最早开展硅光芯片研发制造和流片代工的机构，在硅光前沿技术上处于世界前列；东亚地区代表为新加坡 AMF，是专门进行硅光流片代工的 platform，广泛服务各大高校和研发机构。

- 3) 在 InP 光器件和光子集成芯片领域，我国在科研和产业化水平上同国外差距显著。在 InP 激光器、探测器、调制器的研发上，差距分别为 10-20 年、5-10 年、~5 年；在光子集成芯片上，我们落后 20 年，只相当于本世纪初的国际水平，仅能集成数十个器件，国外已经推出了先进 IDM（美国）和标准化代工，我们只有个别科研实验室。
- 4) 在硅光集成领域，我国目前有联合微电子中心 CUMEC、中科院微电子所 IMECAS 和上海工研院 SITRI 的硅光平台具有芯片加工能力，这些主流平台已实现单波 100Gbps 的流片能力。但是只具备研发代工能力和小批量水平，尚未有商业 Foundry 突破量产制造。行业内不少公司在设计硅光芯片或推出硅光模块方案时，无不受制于海外流片。
- 5) 未来面向更多的应用方向，硅基异质多材料集成等技术的研发及产业化必须满足更高的要求。

### 3. 发展建议

#### 硅基混合集成方面：

- 1) 硅基片上光源。布局基于硅光集成的片上光源技术，用晶圆级工艺实现硅基键合 III-V 族电泵浦激光器、硅基量子点发光结构，开发片上光源与光链路的集成技术，为未来实现完全与 CMOS 工艺兼容的硅基光互连提供解决方案。
- 2) 多材料体系融合集成。充分利用现有的或者改造的硅光工艺平台，打造硅/先进光电材料（III-V，LiNbO<sub>3</sub> 等）混合集成工艺平台，充分发挥 CMOS 超大规模、超高精度制造特性，并结合各材料的光电特性优势，突破高性能混合光电集成芯片制备技术，是硅基集成光电子器件/模块的重要研究方向。
- 3) 2.5D/3D 集成。传统的光子集成封装技术难以满足更高集成度、更高性能、更高工作频率等要求。为解决有机基板布线密度不足的问题，采用硅光集成光电芯片制备 TSV 转接板，将其他 Driver、IC、MCU 等若干个电芯片并排排列在转接板上，通过 TSV 结构、再分布层等，实现光芯片与电芯片间更高密度的互连，减小信号传输延迟和损失，提高信号速度和带宽，降低功耗和封装体积。

### **InP 集成方面：**

- 1) InP 基光子集成已经发展到技术层面的阶段，基础研究较少，研究院所的相关项目和团队越来越少，导致该领域人才匮乏。建议国家制定一些政策支持若干青年团队，为这一领域的持续发展提供生力军。
- 2) InP 基光子集成领域竞争的是技术能力和芯片制造水平，这取决于工艺标准化建设和长期基于标准的经验积累。建议集中建设 InP 芯片平台，开发基于光子集成芯片的关键技术和标准工艺，实现国内流片共享；鼓励国内设备厂商开发相关关键设备，如电子束曝光机、全自动高精度贴片机等；建议通过工艺平台拓展和资本合作的渠道，通过立强论坛等会议，吸引资本的支持。

### 专题 3：光电子与微电子融合仿真与设计

赵佳（山东大学）、刘晓明（华大九天）、宋志刚（中科院半导体研究所）

#### 1. 专题简介

光电融合仿真设计工具是通过结合传统成熟的微电子仿真设计工具和仍在高速发展的光电子仿真设计工具，来实现光电子集成芯片的仿真与设计。相比成熟的微电子仿真设计，光电子仿真设计的计算量大，标准化器件少，从而导致自动化程度较低。而光电子集成芯片在大容量光通信、光计算、光成像、光传感等领域的发展对光电融合仿真设计提出了更高的要求。

光电子集成芯片设计流程以器件设计为基础，自底而上。首先利用 TCAD 工具进行材料工艺仿真，得到材料的光电特性等基础参数，形成相应的材料库；下一步进行无源以及有源器件的仿真设计。其中无源器件通常采用 FDTD、EME、BPM 等仿真算法。有源仿真则通过求解薛定谔方程、载流子输运方程、泊松方程等获得器件的电学性能和光学性能。之后进一步形成器件库与器件紧凑模型，并基于紧凑模型进行链路仿真，然后进行版图设计、寄生提取及后仿验证。

本专题共有 7 篇特邀报告和 6 篇口头报告，包括：云计算下的光电芯片仿真设计软件（周洪超，山东大学）、光电芯片的大规模链路设计、仿真、版图与验证解决方案（陈昇祐，深圳逍遥科技）、光子器件紧凑建模及光电协同仿真（谭旻，华中科技大学）、一种用于模拟纳米结构电磁响应的有效预处理 VIE-FFT 求解器（沙威，浙江大学）、硅基器件辐照效应的多尺度模拟（李永钢，中科院合肥物质科学研究院固体物理研究所）、高性能计算模拟在光伏器件设计中的应用（王睿勳，澳大利亚新南威尔士大学）、纳米光电器件的原子级模拟（任志勇，电子科技大学）、A general design approach for inverted tapers（梁宇鑫，联合微电子中心）、Inverse design of a multifunctional MMI waveguide for simultaneous wavelength demultiplexing and power splitting（孙奥龙，复旦大学）、Impact of driver frequency peaking on system level performance when co-packaged with integrated coherent modulator（余胜，武汉飞思灵微电子）、Multiscale modeling of deep level defect evolution and identification in neutron irradiated 4H-SiC（高扬，中科院合肥物质科学研究院固体物理研究所）、Tunable and efficient near-infrared plasmonic interconnect circuit based on index matching layer and metal reflector（章灿然，东南大学）。



## 2. 主要观点

- 1) 自 2010 年以来，随着光通信、光计算、激光雷达等应用的发展，光电子集成芯片在诸多领域迅速扩展，随之而来的需求是仿真工具向微电子 EDA 靠拢，并促使传统 EDA 和 CAE 软件公司持续投入光电仿真领域，如三大 EDA 公司 Synopsys、Cadence、Mentor Graphic。其他厂商如比利时 Luceda、德国 VPI、法国 CST 公司也在自身实现单一功能设计工具的基础上，向其他厂商开放接口，通过接口文件的相互调用实现全流程设计。
- 2) 从芯片设计到生产需要设计软件厂商与工艺线紧密配合，工艺设计套件（Process Design Kit, PDK）的设计也是全流程仿真中的关键一环，国外 Intel、TSMC、Global Foundry、IMEC、PETRA 等芯片制造厂商均采用 12 寸工艺进行对外服务或者内部开发，各厂商也与 Synopsys、Luceda 等软件公司进行了 PDK 联合开发。
- 3) 国内光电融合仿真设计虽处于起始阶段，但发展趋势很好。山东大学、浙江大学、中科院半导体所、中科院微电子所、华中科技大学、上海曼光、苏州旭创、深圳逍遥科技、华大九天等科研机构和企业 在云仿真计算平台、光电子综合仿真系统、光电设计软件平台、紧凑建模与光电协同仿真、链路仿真环境、光电一体化设计流程等方面进行了部署。

## 3. 发展建议

- 1) 学术研究方面，建议重点支持“器件级”、“算法级”等方面的工作。学术界与产业界在系统级版图设计方面已经有较成熟的产品出现，中科院微电子所、苏州旭创和深圳逍遥科技的产品已经开始在国内工艺平台上验证。但器件级的仿真工具除上海曼光的无源器件模块外，均和国外差距很大，尤其在有源光电器件领域，没有任何成熟的商业化产品，主要是因为器件级仿真算法方面的热度和积累不足。此外，链路级光电融合仿真工具目前还没有成熟产品，也是阻碍大规模设计的主要因素之一。在光电融合的紧凑模型方面，目前国际上还没有统一的标准，这也是需要重点攻关的方向。
- 2) 产业发展方面，建议优先聚焦下一代光电融合仿真设计流程的自主可控。面向特定应用领域，集合学术/产业届的技术人才与资源，实现 1-2 种光电融合仿真设计流程的商用产品落地突破，进而形成产品性能升级与应用场景扩展的技术需求牵引，反过来带动该领域学术/产业的全面发展。建议的特定应用领域包括：硅光通信、硅光传感和硅光计算。
- 3) 支撑能力方面，建议尽快构建产学研用紧密结合的研发与产业生态，构建自主可控的技术研发体系。面向光通信、光传感、光计算等领域的光电融合仿真需求，结合计算体系、工艺平台的发展趋势，聚焦构建基于下一代计算体系下的仿真平台，建立自主知识产权的设

计工具和科研及商业化用户的产学研生态，参考微电子发展经验推动设计工具和工艺的融合，率先建立工艺 IP、模型 IP、器件 IP、系统 IP 的产学研交流机制和平台，在下一代光电子集成的发展过程中建立技术优势。

## 专题 4：光电子集成芯片封装与测试

肖希（国家信息光电子创新中心）、王建伟（苏州旭创）、周林杰（上海交通大学）

### 1. 专题简介

光电子器件的封装是指通过电连接、温控及机械固定等措施将光集成芯片、电集成芯片以及光电子集成芯片密封在一定的机械结构件中，使光电子器件成为具有一定功能且性能稳定的组件的装配过程。而与其对应的测试技术是指通过测试设备及仪器对光电子集成芯片的测试分析，获取芯片性能指标。还包括对封装的光电子器件产品进行光、电等外部性能的测试，获得光电子器件的本征特性参数，为后续的光模块及系统集成提供必要的参考数据资料。

本专题共计 6 篇报告，其中 2 份报告来自于国内极具代表性的光电子集成芯片封装与测试平台，分别为光电子混合集成封装技术及器件应用（王栋，国家信息光电子创新中心）和硅基高密度光电封装进展（陆梁军，上海交通大学），就目前国内外封测技术进行了综述，汇报展示了各自的最新进展及能力建设情况，封装与测试平台已对外开放，竭诚为业界同行提供各项封测服务。另外 2 份报告来自于国内顶级的光电子集成芯片性能测试设备及仪器供应商，分别是基于微波光子技术的光电矢量分析技术及应用（傅剑斌，苏州六幺四）和光通信产业对光电测试仪器的需求及仪器国产化现状分析（聂建华，中电科思仪），重点介绍了国内光电子集成芯片领域对测试设备及仪器的需求、国内测试设备及仪器存在的不足以及后续的发展规划等问题。还有 2 份报告来自于国内代表性的光模块集成企业，分别是光电子集成封装与连接解决方案（张铁军，天孚光通信）和硅光引擎、模块封测技术与挑战（孙旭，海光芯创），从自身企业业务和定位出发，介绍了光模块封装与测试方面的关键技术、解决方案以及面临的挑战。

### 2. 主要观点

- 1) 随着光电子集成芯片技术的发展以及光通信市场的迫切需求，光电子集成芯片封装与测试技术也在加速向更高速率、更高带宽、更高集成度、小体积、低成本等方向发展。
- 2) 封装方案及形式方面：为了满足光电子集成芯片的通道数不断增加（由单通道逐步发展到 4 通道、8 通道、16 通道等）、光芯片与电芯片共封装及异质异构混合集成、集成度越来越高、体积越来越小以及随之带来的 I/O 引脚数成倍增加的需求，封装形式由原先的 TO、DIP、Mini-DIL、金属管壳蝶型封装向 QFN、BGA、LGA 以及 CPO 等形式发展。
- 3) 封装技术方面：为了满足光电子集成芯片速率越来越高、功耗越来越大的发展变化，光电

子器件的封装技术从传统的微电子封装技术出发，不断借鉴微波毫米波器件封装技术以及微电子器件中的先进封装技术。主要表现在封装基板由单一陶瓷基板向高密度互连基板（诸如陶瓷基的 LTCC/HTCC 基板、HDI 的有机基板）发展，光电芯片的贴片精度要求也在不断提高；光输入输出形式由单通道光纤耦合向多通道 FA 阵列化光纤耦合方向发展；器件导热散热方式由 TEC、金属管壳自然散热向空气强迫对流散热方式发展，对于大规模集成光通信模块及系统装备还采用了水冷方式进行散热；芯片集成互连方式由传统的单芯片金丝正装组装(2D)向多芯片三维堆叠方向发展，技术实现方法出现了芯片倒装(Flip-Chip Bonding)、凸块(Bumping)、晶圆级封装(Wafer Level Packaging)、2.5D 封装(interposer, RDL 等)、3D 封装(TSV)等先进封装技术。

- 4) 封装与测试设备及技术方面：随着光电子集成芯片及封装技术的发展，对更高速率、更多通道的高端设备的需求越发迫切。例如可测试的光电带宽逐步从低速率低带宽向 10GHz、26.5GHz、43.5GHz、50GHz、67GHz、110GHz，甚至更高的方向发展。测试用连接器及线缆也逐步从 SMA 向 2.92mm、2.4mm、1.85mm、1.3mm 以及 1.0mm 的尺寸发展。而随着市场领域和规模的不断扩大，封装与测试设备从手动的“作坊式”向半自动化、全自动化方向发展，测试通道数由单通道向多通道并行测试的方向发展。
- 5) 封装及测试平台建设方面：随着上述封装与测试技术的不断发展，特别是光电子器件市场需求及产品形态在某种程度上的颠覆性变化，出现了上游集成芯片企业在向封测领域渗透，而下游光模块及光通信系统集成商也在向封测领域渗透的现象。目前整个光电子集成芯片封装与测试领域呈现出了“各自为营、群雄混战”的局面。

### 3. 发展建议

- 1) 加强器件技术研发和生产，迅速提高国产化率。加大国家重点研发计划及中央财政资金的投入力度，加快基础和技术创新。制定促进光电子产业发展的相关政策，光电子企业享有与集成电路企业相同的产业政策、税收政策和人才政策，快速提升光电子器件的国产化率。
- 2) 优化光电子产业生态，构建长效战略合作机制。加强光电子器件封装与测试制造装备研发，建立公益性的光电子集成芯片封装与测试平台，为高端光电子集成芯片封装与测试技术的研发和生产提供技术支撑和服务。建立光电子器件设计和制备技术标准化体系，增强产业群体国际话语权。鼓励建立光电子器件产业协作联盟，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。
- 3) 加强对光电子集成芯片封装与测试基础材料研发的立项，加大相关科研院所及企事业单位

的研发力量的投入力度，解决我国在基础材料领域存在的短板和卡脖子问题。

## 专题 5：光传输与数据中心应用

张华（海信宽带多媒体）、李俊杰（中国电信）、王会涛（中兴通讯）

### 1. 专题简介

《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》提出构建数据中心、云计算、大数据一体化的新型算力网络，布局建设全国一体化算力网络国家枢纽节点，加快实施“东数西算”工程。围绕集群建设数据中心直连网，建立合理网络结算机制，增大网络带宽，提高传输速度，降低传输费用。数据中心东西互访需求增加，流量流向相对集中，需优化网络架构和组网方案，最优采用一跳直达连接，提升质量。流量急剧上升，以上网日志数据为例，全国日生成数据预计达到 12PB，需要更高速率、更大容量的光传输系统。算和网之间的资源快速联动，对于高等级业务光传送网需要智能化感知业务时延、带宽、QoS 等需求提供端到端服务。互联网业务的快速发展和光网络新型组网方式，对长距传输系统的容量和传输距离提出了新的要求。

本专题共有 10 篇报告，其中 4 篇讲述了数据中心网络发展趋势，所用光电子器件在引入新技术实现互通互连过程中器件的选型、应用方面需求及其标准规范化方面的进展情况，包括 What's next for pluggables in data centers? (Frank Chang, 索尔思光电)、数据中心光互连的新趋势 (陈赛, 阿里巴巴)、化繁为简——光和 IP 网络融合之路 (张玓, 快手科技); 1 篇报告讲述了光传输系统中高效站型方案设计的研究 (陆佳宁, 腾讯); 3 篇报告讲述了运营商围绕算力网络实现高速互联及光算协同对光模块需求，以及关键技术的发展方向，包括高速光互联的发展和挑战 (王雪, 新华三)、超高速光网络发展及关键技术探讨 (王东, 中国移动)、超长距离光传输及其核心器件需求的探讨 (冯立鹏, 中国电信)、400G 应用部署探讨 (沈世奎, 中国联通); 2 篇报告讲述了 F5G 园区光接入网技术趋势 (李良川, 华为) 和 5G 光模块演进方向与趋势分析 (刘会田, 中兴通讯)。

### 2. 主要观点

- 1) 未来数据中心网络将会走向 IP 业务与光融合的光互联网，光电芯片以及先进的封装技术将会推动光互联网的发展，使用更低成本的硬件形态构建传输网络，如数据中心内部使用 400G SR 模块；
- 2) 随着网络速率升级演进，可插拔与 CPO 两种光模块封装方案将会并存。可插拔光模块的封

装形态已经趋于稳定，低成本、低功耗是未来发展趋势；模块承载流量越来越大，智能运维将进入试点。

- 3) 单载波 400G 是继 100G 之后的主流速率节点，是为下一代 OTN 网络实现超大容量的使能技术，其关键技术、器件及芯片逐步成熟，但因噪声、色散以及非线性等问题导致传输距离受限，需要通过研究调制格式、频谱扩展、新型光纤以及 DSP 算法等技术，进一步提升传输能力以满足超长距离的应用；
- 4) 高速相干 WDM 技术，将会出现多种调制格式共存，同时朝着极致超强性能的长途骨干网应用和高集成度低功耗可插拔的城域网应用发展。

### 3. 发展建议

- 1) 面向多种竞争调制格式，收敛调制格式是 400G 面临的首要问题，综合考虑传输性能、成本和产业发展，建议骨干网和城域网至多应用 2 种调制格式。
- 2) 大有效面积低损耗的 G. 654E 光纤适合于承载骨干网 400G 系统，已成为 400G 及更高速率 WDM 系统应用的主要光纤选择，骨干网要加快 G. 654. E 光纤光缆建设，同时加强下一代传输所需的少模光纤、空芯光纤及其相应的芯片、器件和系统研究。
- 3) 频谱扩展传输是未来 400G 及以上 WDM 技术提升容量的关键技术，需要综合评估和考虑，避免产业链混乱和分散。
- 4) 提升 400G 及以上 WDM 系统容量、维持无电中继传输距离时，应在充分考虑工程应用安全的前提下探讨拉曼放大等技术的应用。
- 5) 数据中心模块仍以可插拔为主，成本是方案选择的关键依据，应尽快推进单波 100G 的应用，以及单波 200G 技术的研究。

## 专题 6：可见光通信

迟楠（复旦大学）、陈雄斌（中科院半导体研究所）、汪莱（清华大学）

### 1. 专题简介

可见光通信具有多达 400THz 的候选频谱，具有传输速率达到 100Gbps，流量密度达到 0.1Gbps/m<sup>3</sup> 的潜力，是拓展新频谱，提升网络容量的重要候选技术。此外基于半导体照明的无线光通信技术可与照明系统深度融合，在室内热点高容量场景具有大规模部署的潜力。在全球日益增长的无线通信数据流量需求与有限的射频频谱资源之间的矛盾愈发凸显的当下，VLC 是一种可靠的、有效的通信解决方案。

但是由于目前的可见光通信主要集中在直调直检系统的研究，发射和探测器件面临着带宽受限、调制非线性强、接收灵敏度低等一系列“卡脖子”问题，设计高速可见光激光器、超辐射发光器件与高速广角接收器，探索基于半导体激光器等新型器件的高速、大容量可见光通信架构，将有望从根本上提升可见光通信系统的灵敏度与传输速率，实现 100G 乃至 T 比特量级超高速可见光传输。

本专题围绕可见光核心光电子器件、通信系统、感知通信计算融合等技术，共有 10 篇特邀报告，包括 GaN 基材料与激光器（赵德刚，中科院半导体研究所），氮化镓单晶材料研究进展及其通信应用（刘宗亮，江苏第三代半导体研究院），高效半导体紫外发光与探测器件研究进展（孙海定，中国科学技术大学），可见光通信氮化镓基 Micro-LED 器件研究进展（汪炼成，中南大学）、半导体深紫外发光与红外探测器件研究（吴峰，华中科技大学），以及 GaN 光子集成与可见光通信（沈超，复旦大学）、网络融合架构下的可见光通信感知一体化关键技术（徐子晨，南昌大学）、基于可见光传输的通感能技术研究（路慧敏，北京科技大学）、Photonic neural networks for optical communications（黄超然，香港中文大学）、基于量子级联激光器和量子级联探测器的长波红外空间光通信技术（庞晓丹，瑞典皇家理工学院）。

### 2. 主要观点

- 1) 短波长光子集成是可见光通信的重要支撑性技术，也是通过半导体光电子的技术突破和性能提升来实现颠覆式器件和系统的战略前沿技术。除了满足未来无线通信的需要，也为新型显示、通信传感等产业的创新发展和转型升级提供关键芯片支持。作为电子复兴计划（ERI）的一部分，DARPA 在 2020 年 7 月启动了资助总额 7000 万美元的通用微型光学系统



激光器（LUMOS）项目，研究内容是将多个光子元件组合到单个芯片上，改变激光器和其他光学系统的设计方式，在尺寸、重量、功率，以及系统性能方面都获得提升。其中，在频谱维度上拓展实现可见光与近红外光子集成技术是该项目的三个子课题之一。

- 2) 实现高可靠、小型化深紫外光通信系统，需要解决深紫外激光光源、探测器等核心芯片问题。其中电注入半导体紫外激光器和暗电流低、响应度高的深紫外探测器是未来的发展趋势。
- 3) 光无线通信感知技术的发展也面临着技术和产品应用两方面的挑战：

在技术方面：

- 非视距情况下，如何实现稳定高速的通信？
- 保持通信速率保持稳定的前提下，如何支持终端侧的移动和姿态的变化？
- 如何同时实现高精度光感知和高速光无线通信？
- 适合于光无线通感技术的光源、探测器、光天线、光信道等研究。

在产品应用方面：

应用牵引是可见光通信技术研发的基础。因为光谱对传统蜂窝标准和产业来说，属于新频谱以及非授权频谱，没有相关的标准推动路径可以参考，对于已经落实的应用，国家应该予以扶持和奖励，在产业推广层面提供平台；以光谱为介质的光无线通感技术如何与下一代移动网络其它技术融合，也应该在找准通、感、算需求的前题下，在标准中引入光谱作为一种新技术。

- 4) 光子神经网络展现了神经网络与光通信技术结合后强大的应用潜力，在多个方面，其效果优于传统的神经网络，具备极大的研究价值，目前研究正处于起始阶段，还有很多技术仍需探索。

### 3. 发展建议

- 1) 建设战略定位高端、组织运行开放、创新资源聚集的平台和国家战略科技力量，建立满足宽禁带半导体光电子器件与集成、高速可见光通信芯片研发和中试的公共技术平台，配备专职工程技术人员，建立健全开放运行机制。加强以应用为目标的基础材料、设计、工艺、装备、封测、标准等国家体系化能力建设，引导产业集群化发展。
- 2) 加大在前沿技术和关键技术领域的支持。（1）小尺寸、低能耗、集成度高的半导体紫外光电器件，包括紫外激光器，高效紫外 LED 和短波长/日盲紫外探测器。（2）未来可见光通信在光源技术上需要进一步拓展调制带宽，在功能上需要实现通信-照明、通信-显示一体

化，在环境上要综合考虑人因照明的需要，防控室内外光污染。(3) 先进 GaN 基 LED 器件用于可见光通信系统，在调制速度、发光光束、发光光谱、显色性以及柔性制造及可靠性，系统集成等方面提升空间还很大。(4) 建议进一步研究 GaN 光波导与激光器、光放大器、电吸收调制器、波导探测器等功能器件集成的损耗模型，研究 GaN 衬底同质生长 GaN 激光器和硅基 GaN 激光器平台上集成光波导、光放大器、电吸收调制器、波导探测器，实现单路光电集成系统。在优化片上集成工艺基础上，研究 1xN 平面可见光信号多路传输芯片，制备具有 2 路或 2 路以上光波导的可见光光子集成芯片，通过测试分析研究 GaN 光子集成电路的集成度，研究光子集成芯片的高频特性与频谱非线性特征。

- 3) 开放创新，推进精准深入的国际合作。北欧（瑞典、丹麦、芬兰等）、东欧（波兰、匈牙利等）等在产业链各环节均具备技术特色和优势，但普遍存在产业链不完整、市场规模有限等发展瓶颈，在保证双赢的条件下，开展国际技术路线研究、标准研制等合作。

## 专题 7: 空间激光通信

陈伟 (中科院半导体研究所)、谭庆贵 (中国空间技术研究院西安分院)、

张亮 (中科院上海技物所)

### 1. 专题简介

空间激光通信利用自由空间作为激光信号传输通道,实现端到端的高速光信号连接。主要由激光器光源,光电调制器,光电探测器,基于光学望远镜的发射和接收光机部分组成。

空间激光通信由于具备传输码率高、天线尺寸小以及保密性强等优点,已成为国际公认的实现高速空间信息网络的有效解决方案。空间激光通信系统可应用于军队的安全通信,激光通信终端可安装在单兵手持、机载、弹载、舰载、岛屿等平台上,实现作战单位之间的高速、安全通信;此外,高铁、桥梁、高速公路沿线等移动基站信号难以完全覆盖的区域,可采用空间光通信设备,实现低成本的网络覆盖。

本专题共包含 6 篇特邀报告以及 1 篇口头报告,报告内容主要涵盖空间激光通信的应用背景及需求分析,国内外研究现状,以及系统级和器件级的主要关键技术。其中,中国空间技术研究院西安分院的徐常志研究员从需求角度分析论证了深空探测采用激光通信的必要性,描述了国内外发展现状、关键技术以及未来发展趋势;中电 34 所的刘金标研究员阐述了平流层采用空间激光通信的优势和应用场景及研究现状,分享其研究团对在平流层激光通信载荷研制方面的工作进展和成果;西安理工大学赵太飞教授分享了引导无人机飞行的无线紫外光通信技术,讲述了紫外光通信的基本理论模型及其团队的研究进展;中科院西光所的孟佳成博士针对星间高速激光通信组网需求,介绍了其团队的光报文交换技术方案及样机的研制工作;中科院上海光机所的孙建锋研究员介绍了基于超小型双棱镜扫描技术的新型小型化激光通信终端研制工作,从收发通信模块芯片化的角度阐述了制造低成本、高可靠、小型化通信终端的技术路线;上海大学张俊杰教授分析了空间激光通信采用直调直探和相干调制解调技术路线的优劣,采用其团队开发的编码算法,在直调直探系统上实现了 $-41.5\text{dBm}$  的接收灵敏度;工信部电子第五研究所廖文渊博士介绍了大功率锥形半导体激光器失效机理方面的工作。

## 2. 主要观点

- 1) 深空探测现阶段仍将采用空间激光通信与微波通信相结合的方式实现，需要进一步降低终端的体积、重量和功耗，实现更为紧密集成的收发设备，可采用无信标捕跟技术、集成微波和光学的通信收发技术、以及基于天基中继的微波和光学混合的空间组网技术。
- 2) 空间激光通信除了应用于卫星平台外，在平流层飞行器、飞机、舰船等运动平台通信领域具有很大的发展空间，空间激光通信载荷的小型化、光电载荷一体化是面临的现实需求。
- 3) 由于单个无人机计算、探测和作业能力有限，使用多无人机协作的形式能充分发挥集群无人机的优势，提高无人机执行任务的能力，将无人机飞行引导、测距定位等技术引入无人机编队中，提供动态环境下的可靠隐秘通信。
- 4) 激光终端小型化、低成本是未来大规模应用的必然需求，小型化是技术发展的必然，但单纯的谈论小型化没有意义，激光终端的芯片化是低成本和高可靠的必经之路。
- 5) 空间光交换技术朝着吞吐率更高、颗粒度更多、交换时延更小、端口数更多、插入损耗更小方向发展，技术体制演进方向是光线路交换、光突发交换、光分组交换、智能化光交换。
- 6) 空间光通信的直调直探和相干通信两种体制各有优缺点，直调直探系统简单，成本低，适合中短距离通信；空间相干光通信系统复杂，成本高，适合超远距离通信，未来有望通过光电集成实现低成本相干光通信，相干体制更具有发展潜力。

## 3. 发展建议

空间激光通信是卫星互联网的重要技术支撑，是 6G 网络发展的方向之一，科技部“十四五”重点研发计划“信息光子技术”专项已部署了“高速相干空间激光通信光电子芯片”指南任务。虽然目前空间激光通信技术获得了长足的发展，完成了多次在轨验证试验，但是其大规模商用仍然面临产业化技术不成熟，成本高昂，生产能力不足的困境。

建议在原有部署的基础上，围绕天基和地基空间激光通信组网的需求，开展实用化技术攻关，重点突破产业化面临的产品一致性、可靠性问题，开展批量生产平台建设、实现卫星互联网激光通信产品的低成本制造。

## 专题 8：智能光计算

沈亦晨（曦智科技）、董晓文（华为）、范静涛（清华大学）

### 1. 专题简介

集成光子技术受益于集成电子技术模块化和易扩展的制造方法，并且具有优于集成电子技术的几个关键优势：大带宽、高运算速度、超高并行性工作能力和低延迟、低功耗且对尺寸效应的附加损耗不敏感。同时光子具有传播即计算的特点，其传播过程本身不产生焦耳热，接近零功耗。因此，集成光子技术有望成为实现未来计算性能大幅提升的潜在继任者，尤其是稠密的、高并发式的计算。将该技术与传统神经网络模型结合，能够发挥光(电)子技术特有的优势，有望突破传统电神经网络长延时、高功耗等技术瓶颈。值得注意的是，光子计算与电子计算并不是替代关系，而是共存与互补的关系。光子计算与电子计算各有优势，只有将它们有机地结合在一起，才能最大化的发挥它们的效能。

本专题共邀请了 5 篇报告，包括：传输即计算，结构即功能——对于光子计算的一些思考（伍剑，北京邮电大学）、光学神经网络芯片的实时训练（董建绩，华中科技大学）、基于离散相干空间模式的光伊辛机（冯雪，清华大学）、光学张量卷积运算芯片与系统（张文甲，上海交通大学）、时序光子赋能神经网络智能处理技术研究（石暖暖，中科院半导体研究所）。

### 2. 主要观点

- 1) 光计算芯片实现的主要功能是模拟域的乘加计算，适合包含大量卷积、矩阵-向量乘的 AI 计算，尤其是低精度需求的 AI 推理。目前 AI 市场主要分为推理芯片及训练芯片。训练芯片市场中主要以 NVIDIA 公司的 GPU 为主，其占据了 90% 的市场份额；推理芯片市场则较为多元化，除了 NVIDIA 的 T4, P4 等产品外，还有阿里的含光，谷歌的 TPU V4 等产品。
- 2) 光计算当前发展呈现多样化，计算架构、实现方式及应用场景的创新层出不穷，但可从硬件实现的最基础运算分析，实现的底层运算越简单，其通用性越强。
- 3) 光学乘加或点乘可以构成矩阵-向量乘或者卷积，是光计算里的主流底层运算。实现光学乘加的架构较多，简单可以分为非相干与相干或混合架构。也有初创公司选择了其他的方案，如基于单一无源的散射层、基于可重构或不可重构的空间衍射神经网络、类脑光计算或储备池计算等。

- 4) 在学术界，学者们围绕光计算应用场景或关键指标等提供了一些新思路，例如引入相变材料作为电光调制的媒介（面积，功耗），矩阵-向量分离的边缘计算，验证光学非线性激活函数，硅光集成的散射光学神经网络，新的探测手段（低光功率）等。

### 3. 发展建议

从硬件层面来看，光子计算平台多样化，有光电子集成芯片，基于散射介质层或4F系统的空间光，光纤等，他们有各自适用的计算架构及优势。未来的可能趋势是计算架构和平台之间的融合，集各方案之所长。随着未来硅光工艺的发展及新材料的引入，它的兼容性会越来越好，可作为融合的载体。

从应用层面来看，光计算在未来较长的一段时间内还无法取代电芯片，但在一些特殊的应用，例如伊辛机、傅里叶变换、随机投影、加密解密等应用场景，光计算显现出了更高的优越性，可作为专用的加速芯片融合至现有的计算系统中。在系统级别如何能够高效地实现光电融合，软硬协同将会是未来解决这一问题的研究方向之一。

考虑到未来光芯片规模及集成度的提高，在产业生态方面，可借鉴电芯片，完善大规模硅光芯片的前端设计验证流程，并打造先进的光电混合封装技术。

## 专题 9：光量子器件与系统

王剑威（北京大学）、金贤敏（上海交通大学）、苏晓龙（山西大学）

### 1. 专题简介

光子具有高速传输、低噪音、多可调控自由度等显著优点，被认为是量子信息技术的重要的载体之一。然而传统的光量子技术需要将数量庞大的分立光学元件组装起来，占用空间大、稳定性不足、可编程能力较弱，制约了光量子技术的进一步发展，集成光量子芯片的出现可以有效地解决这些问题，通过使用半导体微纳加工工艺，制备出高品质、可大规模阵列化集成的微型光量子器件，包括量子光源、量子调控光路、单光子探测器等核心器件，从而达到对量子信息的载体单光子进行片上计算、传输、存储和检测等功能。集成光量子芯片技术具有集成度高、稳定性高、可控性强和易扩展等诸多优点，从而为光量子信息处理、量子通信、量子计算和模拟等提供了一个可集成、可扩展、高可控的硬件平台。

本专题共有 8 篇邀请报告和 1 篇口头报告，包括：基于奇异点的拓扑动力学和精密测量（徐海潭，南方科技大学）、基于光力芯片的量子换能器（邓光伟，电子科技大学）、高性能硅基光子集成器件及其在量子领域的应用（张明，浙江大学）、Recent progress in photonic crystal ring and its applications（Xiyuan Lu, University of Maryland, USA）、芯片化量子通信和量子网络（徐飞虎，中国科学技术大学）、量子纠缠分配网络及其光子芯片（张巍，清华大学）、小型化硅光器件和三五族器件加持下的实用化量子密钥分发（钱懿，中国信息通信科技集团）、硅基可编程光量子计算芯片与进展（强晓刚，军事科学院国防科技创新研究院）、Edge state, localization length, and critical exponent from survival probability in topological waveguides（Licheng Wang, 吉林大学）。

### 2. 主要观点

- 1) 目前芯片上主流的量子光源有基于半导体自生长的量子点光源、基于非线性参量过程的光子对光源和压缩光源。
- 2) 量子态调控需要量子干涉器件、量子逻辑门、量子纠缠衔接门等重要器件，并且要求量子调控器件具有可编程重构性。基于热光效应和电光效应的可编程量子器件已被实现，芯片上可编程的线性光学网络模式数目达到 8X8，大规模可编程器件的数目已超过 550 个。
- 3) 高效率单光子产生等任务要求探测结果能够实时处理，快速反馈至调控单元，完成具体的

量子运算。既能探测光子状态，又可实时处理光探测信号，既可以实现大规模探测器阵列读出，又可结合量子调控单元实现反馈控制，是量子调控对新一代单光子探测技术提出的需求。

- 4) 量子密码利用量子力学原理实现经典技术手段难以实现的密码学功能，在保密通信和信息处理中有重要应用价值。集成光量子信息技术是量子密码技术走向实际应用的关键。基于光纤传输的典型的量子密钥分发商业系统工作距离达到 50-100km，在科研实验报道中可以将其推到 400km 以上。
- 5) 量子计算通过对量子比特的操控实现“量子并行计算”能力，在传统计算机难于处理的某些重要问题上具有非常明显的加速功能。利用光子作为量子比特是实现量子计算功能的重要途径。针对一些特定计算问题发展的专用光量子计算系统获得了长足发展，例如量子玻色采样，近期有望展现出优于经典计算机的能力。
- 6) 量子精密测量与传感是利用量子资源和量子效应实现超越经典方法的测量精度，并通过量子操控实现对磁场、惯性、重力、时间等物理量的超高精度测量，可被应用于导航定位、航空航天、守时授时和资源勘探等国家重大工程中，如高精度光频标与时间频率传递、量子陀螺仪、原子重力仪和量子导航、量子雷达、弱磁场探测等量子灵敏探测技术。但是由于量子精密测量系统的复杂性，当前芯片化研究仍在起步阶段。
- 7) 在集成光量子关键器件和光量子芯片应用的研究上，我国处于领先地位，主要研究机构包括中国科学技术大学、北京大学、南京大学、中山大学、浙江大学、清华大学、军事科学院、北京量子信息科学研究院等。国外的主要研究机构包括英国布里斯托尔大学、英国牛津大学、意大利罗马大学、奥地利维也纳大学、美国麻省理工学院等。

### 3. 发展建议

- 1) 关键光量子功能器件和芯片的自主研发。重点研究集成型单光子源和纠缠光子源芯片，大规模集成光量子芯片，超导纳米线单光子探测器芯片。建议大力支持用于光电子芯片、光量子芯片制备的先进工艺线搭建和系统管理、以及工艺研发。
- 2) 面向光量子计算和模拟的光量子芯片。我国在光量子计算相关领域的研究处于国际领先水平，但光量子计算系统普遍基于分立光学器件。建议重点发展面向光量子计算和模拟的光量子芯片技术，包括材料、器件和模块等硬件技术，以及架构和算法等软件技术。重点研究光芯片上复杂多光子量子态和量子纠缠态的精确制备、相干操控与测量技术，光子和物质相互作用形成的可复杂集成的量子操控技术，以及量子计算需要的大规模光量子系统集



成技术，开发能模拟复杂物理、化学体系的量子模拟机。

- 3) 光量子密码功能集成芯片技术。我国在光量子密码的基础理论和系统实现方面已经有长期的研究工作积累，在卫星量子密钥分配，高速量子随机数发生器和长距离光纤量子密码分配系统等方向处于国际先进水平，一些技术已经进入应用推广阶段。另一方面，目前国内发展光量子密码应用系统普遍基于分立的传统光通信器件。建议重点发展光量子密码功能集成芯片技术。借鉴光电子技术发展的经验，关键光量子密码功能的芯片集成化是简化光量子密码系统结构，降低系统成本的有效手段。
- 4) 全固态光量子传感器。量子传感在中性冷原子或离子系统中已展现出高性能，但此类传感器通常需要高真空和低温系统配合，应用场景受限。通过在全固态的芯片上引入光与物质相互作用的量子效应则可以大大简化量子传感器的复杂性，从而拓展其使用条件。建议重点发展全固态光量子传感器技术，重点研究在固态芯片上实现光与多种物质形态相互作用及其精密测量的关键技术，开发具有自主知识产权的全固态光量子传感器芯片等。

## 专题 10：多维光存储

张继军（中国华录）、张启明（上海理工大学）、李向平（暨南大学）

### 1. 专题简介

随着 5G 时代的到来，物联网、大数据、人工智能等新应用产生的数据量将大幅增长，预计到 2025 年全球数据量将达到 175ZB，全球数据存储行业市场规模将达到 3003 亿美元，从数据使用频度分析，有 85% 左右被访问和读取的频率较低，称为温冷数据。目前全球外部存储市场主要采用磁存储、电存储和光存储三种。其中，光存储在数据安全（防电磁干扰、病毒破坏、恶意篡改）、长寿命（100 年）、稳定、节能存储方面有着绝对优势，十分适合以温冷数据为特征的档案灾备行业（如具有高安全性要求的重要数据）。但是由于目前光存储仍处于技术发展和市场培育期，在全球的大数据存储市场方面主要采用磁存储，其中我国目前 95% 的市场为磁存储，面临耗电量大（几乎年耗电量超过三峡大坝当年全年的总发电量）、存储寿命低、易受电磁干扰等问题。并且磁电存储技术一直被西方国家垄断，存在关键核心技术“卡脖子”问题，而光存储有望实现自主可控。

本专题涵盖应用需求和前沿技术两个有机部分，共有 5 篇报告，包括：深度学习在全息存储中应用（林泉，福建师范大学）、基于微芯片的可拓展 DNA 存储（刘宏，东南大学）、玻璃微纳结构调控及其光存储应用（谭德志，之江实验室）、纳米光子学光信息存储进展（张启明，上海理工大学）、光盘聚焦光斑的检测及相关研究（张勇，中国华录集团有限公司）。专题各报告内容紧贴主题，既有广度又有深度，为与会人员提供了很有价值的参考。

### 2. 主要观点

- 1) 预计到 2025 年我国数据量将增至 48.6ZB（占全球份额约 27.8%），根据光存储上市公司年报推算，预计到 2025 年中国数据存储行业市场规模将达到 5191 亿元，而光存储及配套解决方案、服务咨询等市场规模到 2025 年的潜在需求约为 50 亿元，仅占国内数据存储行业市场规模的 1%，离需求还有较大缺口，有着广阔的市场提升空间。
- 2) 近年来多维光存储技术研究已进入快速发展阶段，存储机理和新型纳米光存储材料是国内相关领域的研究热点。超分辨技术以国内上海理工大学的顾敏院士团队为代表，首次提出并利用上转换纳米颗粒在碳基氧化石墨烯相互作用实现了单盘 700TB 的光存储容量，此外澳大利亚悉尼科技大学、国内华中科技大学、暨南大学、浙江大学等多个院校机构也

同步推开展研究。在全息存储领域，日本 NHK 公司和东京理工大学分别研发了两种原理的全息读写装置，国内福建师范大学提出了同轴全息光存储技术并正在研发原型样机，预计可达到单盘 1TB~2TB 容量，但在产业化方面仍有较多的问题需要克服。在玻璃存储领域，英国南安普敦大学、俄罗斯莫斯科州立大学、美国微软公司和国内华中科技大学、吉林大学都同步展开研究，目前利用飞秒激光直写技术在石英内部形成“纳米光栅”的双折射结构来保存信息，存储寿命可达上千年，但仍处于理论研究阶段，距离商业化产品还有很长一段路要走。

- 3) 产业发展方面，日本松下、索尼和中国华录集团采用蓝光技术均已实现单光盘 500GB 商用，华录集团拥有光存储较为完整的产业链，是国内唯一较完整掌握光存储核心关键件、系统设备、光电磁融合存储、大数据治理应用等重点环节的企业集团，苏州互盟公司等企业也取得了一定进展。相比而言，国外不具备整机、关键件和零部件的产业能力，蓝光产业应用和市场基本都在中国。

### 3. 发展建议

- 1) 加大政策支持力度，打造光存储战略科技力量，促进光存储基础技术研究和产业化落地。建议在冷数据灾备市场明确以光存储取代磁存储的战略目标，组织国内顶尖高校、研究所和优秀企业，以产学研结合的方式推进下一代高密度光存储技术和产品研发，打造光存储领域的战略科技力量。同时鼓励社会资本进入，加大力度突破光存储材料、光学设计、AI 核心算法等关键技术的攻关研究，尽快提高技术成熟度并达成产业化目标，形成光存储发展的战略优势。
- 2) 加大光存储平台建设和人才计划支持力度。建议在光存储领域部署建设一批重大科研基础设施和重大科技创新基地，增设一批光存储国家技术创新中心、国家重点实验室、国家工程研究中心等重大创新功能平台。
- 3) 加强光存储行业引导，完善信创体系和自主产业链。建议由具备较好产业和技术基础的龙头企业牵头，带动产业链各创新主体对核心技术和关键零部件等产业链关键环节进行联合创新攻关，推进如光盘记录材料、母盘、光电 IC、半导体激光器等材料和零部件的自主可控替代，夯实光存储自主可控产业链，缓解卡脖子风险。
- 4) 加强行业应用示范，发挥光存储独特技术优势。建议将自主可控的光存储设备列入政策采购建议清单，优先采用光存储作为温冷数据存储介质，对磁盘、磁带等形成替代，逐步改变大数据存储严重依赖欧美厂商磁存储技术和产品的不利局面，实现 120 亿~150 亿国内

档案灾备市场由光存储取代。通过温冷数据存储向光介质转移，实现重要数据安全、稳定、节能、长期保存，有效提升数据存储抗病毒、防篡改和抗极端环境能力，建立国家数据存储安全的基础防线。

## 专题 11：光显示

黄玲玲（北京理工大学）、桑新柱（北京邮电大学）、李泠（中科院微电子研究所）

### 1. 专题简介

光显示即利用光学原理将图像信息展示呈现的技术，是信息链的终端，是材料科学、微纳光学、光电器件、光学设计、先进加工、计算技术等多领域交叉融合的技术领域。

传统光显示经历了由黑白到彩色，由显像管到液晶再到 OLED、 $\mu$ LED，由二维到三维的发展历程。随着技术进步，新型光显示瞄准高质量、高清晰度、灵活、符合人眼观察习惯等目标，新材料、新器件、新技术、新方法层出不穷，一直是相关领域的研究与投资热点：（1）在新材料方面，量子点、钙钛矿等发光材料的合成与制备，提高了发光效率，延长了使用寿命；

（2）在新器件方面， $\mu$ LED、低失配异质结光源、新型微纳光电器件等的诞生显著提高了光电器件的发光性能，加强了光波场调控能力；（3）在新技术方面，全息显示、柔性显示、显示信息智能计算处理等手段，不断突破传统技术瓶颈、扩展显示功能；（4）在新方法方面，眼动跟踪裸眼三维显示、光场显示、近眼显示等方案，有效地提升了显示效果，扩展了实际应用场景。

本专题共有 5 篇邀请报告和 1 篇口头报告，其中 3 篇报告主要介绍显示核心器件与技术以及面向应用场景的发展情况，回顾了技术发展历程，国内外技术与产业发展现状，包括激光显示技术最新进展（毕勇，中科院理化技术研究所）、Harnessing plenoptic function for 3D display（周建英，中山大学）、自由立体三维显示的技术创新与医学应用发展（廖洪恩，清华大学）；其余几篇报告围绕量子点显示材料展开，阐述了新型材料组分结构带来的显示性能提升，介绍了结构与应用的最新进展，包括量子点显示（孙小卫，南方科技大学）、钙钛矿量子点的原位制备与集成应用研究（钟海政，北京理工大学）、Full color micro QLED via meta-cavity（王凯，南方科技大学）。专题报告贴合主题、内容全面，全方位地介绍了光显示的发展，即有前沿科技又有产业动态，为与会人员提供了很有价值的参考。

### 2. 主要观点

- 1) 光显示产业规模不断扩大，2020 年我国显示产业规模已经突破人民币 4 千亿元，产业规模居全球第一。
- 2) 传统的显示材料在发光效率与使用寿命上互相制约，而且面临工艺复杂、成本高、国外专利壁垒等挑战；显示器件效率低、调控能力单一、结构复杂，高性能器件依然依赖进口，

难以满足新型显示的需求。

- 3) 新型光显示，通过引入最新的物理、化学原理，突破已有材料限制，创新元器件组成结构，改革光信息影响调控生成方式，开拓全新系统架构，融合先进制造、高性能计算、光电子技术等其它领域前沿科技，实现显示效果的提升。
- 4) 光显示材料方面，研发先进光学发光材料的合成与制备工艺。目前，搭载量子点背光的液晶显示电视已经实现商业化，2020年市场渗透率达到5%，并在逐年增加。传统的量子点材料（CdSe、InP）一般采用高温热注入法制备，产业化挑战众多。钙钛矿量子点制备简单，具有优异的光学性能。通过研究不同钙钛矿量子点原位制备方法，控制钙钛矿成膜中的结晶过程，实现钙钛矿量子点片上再沉淀制备，提高材料的外量子效率以及稳定性。相比于传统量子点材料，在亮度、色域、信赖性等方面提升显著。
- 5) 光显示器件方面，研制高性能新型光发射与光调控器件。 $\mu$ LED与集成激光光源是新型光发射器件的研究热点。 $\mu$ LED与量子点相结合，是实现全彩色化显示的一条重要途径。通过在外延生长过程中控制缺陷态密度，可以有效提高 $\mu$ LED器件的外光电效率。在新型光调制器件方面，自由曲面与微纳光学元件提供了两条不同的道路：前者通过先进精密加工工艺，实现了更加灵活的光学折反射面的制备，从而解决了传统球面像差大、非球面功能单一的问题，能够有效降低光学系统体积；后者利用亚波长特征尺寸结构与光的强烈相互作用，实现传统折反射、衍射光学元器件无法实现的调控目标，从而使得元器件更加轻薄、功能更加强大，特别是主动微纳元件能够突破外国对传统光电调控器件的垄断。此外，针对新型液晶调控器件的研究也在不断深入。
- 6) 光显示方案方面，研究实现高显示效果、符合人眼观看习惯的显示方式。现有的各类新型显示技术方案都面临着信息显示与器件设计优化中海量数据的处理速度不足的问题。通过引入自由曲面与微纳光学元件以及其它新型光学元件，采用全新的物理和技术原理，扩展光学调控自由度，优化系统架构，实现小型化、集成化的新型显示系统。

### 3. 发展建议

- 1) 基础研究方面，建议加强对新材料、新物理、新理论、新技术等方面的基础研究。创造性的引用科学前沿理论，充分挖掘新型组分与结构的潜力，提升新材料性能、降低规模化制备难度，加强以微纳光学元件为代表的新型显示元件与新型光电显示器件的研发，拓展技术路径性能极限，前瞻性地探索和研判光显示的未来发展路径。
- 2) 应用研究方面，建议“软硬结合”，加强研究与制备基础，提升器件与系统的研发水平。

进一步加强设计与器件研究，利用新型器件实现弯道超车，集中力量解决元器件的设计软件只能依赖于进口、元器件的大批量加工设备依然无法自己自足的“卡脖子”问题；促进新型元器件与系统的整合水平，提高系统集成化设计，提升新型光显示技术的集成度。

- 3) 产业化方面，建议进一步加强产研交流、结合与协同，建立更加紧密的产学研用循环生态。以需求与市场为引导，打造虚拟现实增强现实装备、物联网设备、医疗健康设备等一系列典型示范应用，加强知识产权布局，打通技术、产品上下游，促进建立一系列中试平台，促进技术成果快速落地。

## 专题 12：光成像

徐江涛（天津大学）、曹良才（清华大学）

### 1. 专题简介

随着人类社会从信息化时代向智能化时代迈进，光成像技术作为我国发展人工智能、集成电路、新一代信息技术、生命健康、空天科技、高端装备等领域及未来产业的关键技术，是我国科技强国战略的重要一环。智能军事装备、自动驾驶、智能制造、生命医疗、虚拟/增强现实等领域的崛起推动光成像技术向更高分辨率（亿级）、更宽波长（1 微米以上）、更高速度（万帧/秒）、更多维度（光谱、相位、偏振等）、立体成像、单光子级灵敏、更高动态范围（150dB 以上）和智能化图像传感等多功能、高性能方向发展，这意味着我们急需探索新型成像机理，研制新型成像材料与器件。

本专题共有 10 篇特邀报告和 1 篇口头报告。其中 4 份报告重点介绍了低噪声及高灵敏度光电成像器件（聂凯明副教授，天津大学）、量子传感器读出电路（尹昭杨博士，Gigajot Technology Inc.）、高动态图像传感器（常玉春教授，大连理工大学）、单光子传感器（刘力源研究员，中科院半导体研究所）等；2 个报告讲述了单像素计算成像的研究进展，包括光场多维度单像素成像技术（孙宝清教授，山东大学）与基于 LED 高速响应的计算成像技术（孙鸣捷教授，北京航空航天大学）；2 个报告讨论了超表面材料在图像显示（郑国兴教授，武汉大学）及高光谱分辨率探测器（张钰教授，杭州电子科技大学）中的应用研究；2 个报告介绍了微光图像增强技术（张航瑛博士，清华大学）与微分成像技术（陈妮博士，阿卜杜拉国王科技大学）。

### 2. 主要观点

#### 1) 光子器件

使用超表面材料实现的超透镜可满足超小体积、超高效率、超大角度与多功能集成等要求。以 Metalenz、NIL Technology 为代表的国际领先超构表面公司在商业化方面进展迅速：Metalenz 将超构光学技术与半导体制造工艺相结合，将光学超构表面透镜应用于意法半导体 FlightSense 系列 ToF 测距传感器 VL53L8；南京大学的李涛教授等将超透镜阵列——可操纵光的平面纳米结构表面与 CMOS 图像传感器相结合，可获得大于 120° 高质量的广角图像；南京大学王振林教授和祝世宁院士团队利用横向色散超透镜阵列构建了超紧凑型光谱光场成像



(SLIM) 系统，其通过单色传感器的一次快照记录 4D 信息，可捕获高分辨率光谱。

## 2) 成像器件

CMOS 图像传感器是光成像系统中的关键器件，当前图像传感器市场前三名是索尼、三星、韦尔，占据 70% 以上的份额，格科微和思特威分别占 4% 和 2%。

三维图像传感器方面，领军企业包括意法半导体、AMS、英飞凌、索尼。三星最新提出的 120 万像素的三维堆叠 iTOF 芯片，4-tap 像素可同时接收四个相位的信号，实现 60fps 速率，在生成优质深度图像的同时可以消除多 TOF 相机之间的干扰。索尼最新研发的 11 万像素三维堆叠 dTOF 传感器，适用于车载激光雷达，测距可达 300 米，其中  $10\ \mu\text{m}$  SPAD 像素结构保证了 22% 光子检测效率，响应时间仅 6ns。

量子图像传感器方面，该种传感器通过特殊设计在大幅提高像素灵敏度的同时将噪声降至  $0.5e^-$  以下，通过多个 bit 平面时域脉冲组成光子捕捉矩阵，处理合成后输出一幅最终图像。发明者 Gigajot Technology 最新发布的 4100 万像素的 GJ04122 传感器读出噪声低至  $0.35 e^-$ ，在突破微光成像极限的可达 95dB 单次曝光动态范围。

动态视觉传感器方面，企业有三星+iniVation、索尼+Prophesee、Insightness 等，高校有苏黎世大学、苏黎世联邦理工学院、瑞士洛桑联邦理工学院及西班牙塞维利亚大学等。索尼与 Prophesee 联合发布的基于背照式三维堆叠技术的  $1280 \times 720$  事件型图像传感器，事件率可以达到 1.066Geps，采用业界最小  $14.86\ \mu\text{m}$  像素单元，通过高光孔进光率技术达到业界最高的 124dB 动态范围性能。

## 3) 新型成像机制

基于光的量子理论的新型成像技术正方兴未艾。如，“鬼”成像 (ghost imaging) 又称双光子成像 (two-photon imaging) 或关联成像 (correlated imaging)。意大利国立核物理研究所提出的“关联全光场成像” (Correlation Plenoptic Imaging, CPI) 技术，采用  $512 \times 512$  分辨率的 SwisSPAD2 阵列，能够解决现有全光场器件的分辨率缺陷，并保持重新聚焦能力和三维重建的优势。除此之外，量子成像还引申出单像素成像技术，它通过结构光照明实现空间信息的采集，颠覆了传统的成像模式，对探测器的要求远远低于普通成像中的面阵探测器，尤其在某些特定波段具有巨大的应用优势。

## 3. 发展建议

未来光成像技术向更强性能和多功能集成的方向发展，针对此趋势，我国光成像技术的发展布局应主要围绕高速、高分辨率、高动态范围、微光、仿生视觉智能成像、3D 成像、光谱

成像等方面开展新型成像材料、器件、芯片与系统研究：

**高速成像：**发展 200 万像素以上、万帧/秒以上高速拍摄、亿帧/秒瞬间拍摄，满足高性能军事、工业、科学实验研究的需求；

**高分辨率成像：**拍照由千万像素向亿级分辨率发展，摄像由 2K 向 4K、8K 发展，满足未来超高清图像、视频拍摄需求。

**微光高动态范围成像：**面向夜间微弱光环境，发展  $10^{-4}$ lux 条件下成像，满足军用、海洋、高端监控等微光夜视需求；面向大光比场景，创新像素结构与曝光方式，发展 150dB 以上高动态成像技术，满足昼夜作战等成像需求。

**仿生视觉智能成像：**面向目标识别，高效捕获动态、光流等特定视觉信息，满足无人系统自主定位、避障等需求；基于三维堆叠工艺进行感算一体成像。

**定量相位成像：**面向生命科学研究与医学诊疗，发展大视场、高分辨定量相位成像技术，实现高通量、无标记活体成像与检测。

**三维成像：**将 2D 成像发展为 3D，提供三维视觉信息，尤其是基于 SPAD 的长距离 3D 成像，满足自动驾驶等环境探测需求。

**宽光谱成像：**从 RGB 三色成像向全光谱范围的多/高光谱成像发展，满足水质监测、地质检测、农作物监测等领域需求。

**感存算一体化：**研究 2D、3D 与速度场融合的多维度视觉信息传感技术，基于三维堆叠工艺探索光电感存算智能成像系统设计方法，满足面向大数据边缘实时处理需求。

## 专题 13: 微波光子集成

潘时龙（南京航空航天大学）、周涛（中电 29 所）、李王哲（中科院空天信息创新研究院）

### 1. 专题简介

微波光子集成技术研究的是将微波调制到光频段并在光频段实现微波信号的产生、宽带/高速处理与接收的集成光电子器件及芯片,是未来空、天、地信息一体化网络、6G 移动通信、超宽带无线接入网、多波束光控相控阵雷达、电子对抗系统的核心技术。微波光子集成器件/芯片具有体积小、重量轻、低功耗、大带宽、快速可重构等优点,是微波光子学走向全面实用化的关键。

本专题共有 5 篇邀请报告和 3 篇口头报告,包括:高速铌酸锂薄膜光电子器件(蔡鑫伦,中山大学)、面向微波光子链路的激光信号传递(王天枢,长春理工大学)、低功耗硅基光电子芯片与系统应用(王兴军,北京大学)、硅光集成和微波光子学(余辉,浙江大学)、绝缘体上铌酸锂器件制备及其非线性光子学应用(郑远林,上海交通大学)、Silicon based microwave photonic bandpass filter with broadband tunability and reconfigurability(刘一凡,华中科技大学)、Silicon based parity-time symmetric optoelectronic oscillator(王琳,华中科技大学)、Ultra-compact and high bandwidth silicon modulator(韩昌灏,北京大学)。

### 2. 主要观点

- 1) 在微波光子单元芯片与单片集成技术方面,目前功能单元基本上都有相应芯片原型器件报道,如窄线宽半导体激光器芯片、高转换效率光电探测器芯片和高线性电光调制器芯片,少量研究成果已实现产业转换。但一旦实施多类异构器件的单片集成,无论是单元器件还是片上系统的性能与分立器件和系统相比处于劣势;而且单片集成度仍较低,亟待加强技术与应用迭代。
- 2) 在异质异构微波光子集成技术方面,当前仍缺乏面向微波光子集成的新材料、新结构、新器件的系统性研究,以及缺乏片上多物理场(如光/电/热场)的有效调控机理与相互作用方法等支撑。尤其突出的是在微波光子集成芯片流片过程中,光信号产生、传输、调控、处理和接收器件的最佳材料衬底和制造工艺差异很大,传统的单一材料和单一工艺体系无法满足未来微波光子集成与芯片的发展要求。因此,迫切需要发展微波光子系统单片集成、

异质集成、混合集成、微组装等工艺技术，并解决不同材料体系的兼容与高效耦合问题，以及实现多种材料芯片的兼容制造与封装测试等。

- 3) 在面向泛在接入与一体化系统需求的微波光子集成技术方面，单一功能或固定功能的微波光子芯片可能无法满足未来泛在接入与一体化需求，多波段、多通道、多功能、高重构性、高集成度、智能化的微波光子芯片与封装也是当前面临的巨大挑战。
- 4) 微波光子集成的发展方向包括：
  - a) 单一功能器件的集成,例如亟需研发高功率、低噪声、窄线宽的半导体激光器芯片，宽带、低半波电压、高线性度的电光调制器阵列芯片，以及宽带、高饱和光功率和高响应度的光电探测器阵列芯片。这些将有助于集成微波光子芯片的功能单元种类不断增加、性能不断提升，从而逐步替代传统系统中的各类核心电子组件，为微波光子集成芯片的实用化和产业化奠定坚实基础。
  - b) 光电融合的功能芯片集成,结合强大的微电子集成技术基础，构建从单一材料体系向多材料体系混合集成的高集成度微波光子集成芯片研发模式，重点研发异质混合集成的微波光子芯片，实现高功率低噪声激光源、高效电光调制器和高饱和、光电探测器的单片集成，实现光电混合封装与测试、大规模芯片驱动与控制关键技术等。
  - c) 多功能、多通道、可重构的系统化集成,研发面向不同应用场景的功能集成芯片，包括集成化波束形成、光子模拟信号处理、光电振荡器、光频梳、任意波形产生、混频与对消、光模数转换、模拟信号光电收发、光纤稳相稳时传输芯片与模块等；并提升不同功能的芯片和单元组件的集成化程度，实现微波光子多功能集成发展。同时，逐步研发多通道多波段的芯片和阵列化封装技术，满足大规模阵列化需求。在此基础上，通过多芯片微组装的混合集成实现小型化微波光子系统，推进微波光子模块的系统应用。此外，为提高芯片的通用性，通过众多有源或无源可调谐单元器件大规模网络化集成，研发功能可重构的微波光子集成芯片，实现片上通用微波光子信号处理和运算功能（如光子 FPGA、模拟光子计算机等）。
  - d) 智能化的微波光子集成,在多功能、阵列化和可重构集成的基础上，微波光子集成芯片还可以与人工智能深度融合。基于人工智能算法和方案赋能微波光子集成芯片和系统，从而推动微波光子技术综合性能提升和实用化进程。

### 3. 发展建议

- 1) 加强微波光子核心元器件的投入和研发，构建微波光子芯片光电热微波联合仿真与版图绘

制软件，设计高性能微波光子集成单元器件 IP 库，在此基础上构建超宽带、多通带、多功能、可重构的微波光子信号产生、处理与接收模块库；构建集成光子芯片流片平台，通过技术迭代不断优化材料生长与微纳加工工艺，实现稳定可控的流片，达到国际先进水平；研究多材料体系的光电异质混合集成封装平台，解决多通道微波光子集成芯片的宽带光电混合封装等难题；构建光子集成芯片晶圆级片上测试平台，开发测试系统，使之匹配于我国当前微波光子芯片与集成的发展水平，最终围绕微波光子芯片与集成构建成从芯片设计、制造、测试、封装的一体化研发平台。

- 2) 加强高校、研究所、公司企业等之间的合作交流，促进共同进步。提倡鼓励研究能力高，资源充足的队伍进行讲座等学术活动，对底子尚浅的队伍起到帮扶与激励作用。另外，提倡鼓励国内构建完善的研发机构联盟，使整个行业的发展形成良性循环。
- 3) 建议面向宽带网络（接入等）、航空航天、轨道交通、超快成像等国家战略领域和重点领域，推动微波光子学在这些行业的特色应用，作为技术发展、示范推广、国民经济的新增长点。

## 专题 14：激光雷达芯片

曾理（华为）、潘教青（中科院半导体研究所）、陈明华（清华大学）

### 1. 专题简介

激光雷达 (Lidar-Light Detection and Ranging) 通过激光主动探测获取精确距离, 并利用光束扫描生成数以千万计的三维点云数据, 为机器提供三维环境呈现和目标感知。由于具备良好的测远能力、高测距精度、高图像分辨率, 激光雷达成为下一代自动驾驶汽车的核心传感器之一。2022 年是激光雷达上车元年, 多家车企联合激光雷达厂商发布安装激光雷达的新车型, 为下一步自动驾驶功能的实现奠定硬件基础, 新车型发布也加速了激光雷达的市场化进程。除了自动驾驶领域, 激光雷达还广泛应用于手机终端、工业制造、物流和地图测量等领域, 全球知名咨询公司 Yole 的 2021 年版《汽车和工业应用的激光雷达》行业研究报告显示, 激光雷达市场正以年复合增长率 21% 的幅度增长, 到 2026 年, 汽车和工业应用的激光雷达市场规模预计将达 57 亿美元, 其中自动驾驶领域占比达到 41%。

本专题共有 10 篇报告。硅光集成调频连续波 (FMCW) 激光雷达 (王冠, 摩尔芯光) 介绍了采用自研集成光电芯片, 达到 32 线清晰的三维点云图像。有 2 个报告和激光器相关, 面向激光雷达应用的混合集成窄线宽连续调频激光器 (陈明华, 清华大学) 提出集成氮化硅外腔芯片做自注入的窄线宽 FMCW 激光器, 可实现大于 5GHz 调频带宽, 本征线宽 < 50Hz, 并提出了在氮化硅波导上的压电驱动新技术, 提高了调频速度。面向激光雷达应用的高功率, 高集成化 VCSEL (王嘉星, 深圳博升光电) 展示了可选址 VCSEL 阵列 (1x4, 8x8 阵列)、高功率多结 VCSEL (可实现 6 结, 约 4000W/mm<sup>2</sup> 功率密度) 和超结构 HCG VCSEL, 而创新 HCG 结构的 VCSEL, 减少了传统外延工艺的时间和复杂度, 可以实现低发散角单偏振的高质量光束。还有 4 个报告和接收探测器相关, 短波红外 APD 焦平面技术及发展趋势 (崔大健, 中电 44 所) 介绍了国内外在 InP 基 APD 方面的发展现状, 对比线性模式 APD 和盖革模式 APD 技术特点, 指出单光子探测器 SPAD 面临的挑战 (降低暗计数率 DCR 和阻塞效应), 以及研究建议。低暗计数 InP/InGaAs 单光子探测器 (史衍丽, 云南大学), 通过改进结构和扩散工艺, 在 -40°C 实现了 50 % 的探测效率, 并采用双脉冲叠加技术, 暗计数率 < 10kHz, 同时展示了集成不同阻值电阻的集成负反馈机制对暗电流和后脉冲的抑制。单光子 d-ToF 传感器 (李成, 南京芯视界) 报告了单线 SPAD 器件已广泛应用于扫地机器人、无人机上; 阵列 SPAD 器件, 分辨率 320x240, 测量距离 15m; 下一代产品将利用最先进的工艺及设计技术, 并基于 BSI 封装工艺实现堆叠式的 3D dToF, 性能将达到

业界领先。集成化激光雷达前端接收芯片（赵毅强，天津大学）报告了接收器的模拟前端芯片，采用新型高速采样低速读出 SSA-TDC 结构，集成了 8 通道模拟前端芯片，采用 0.18um 工艺，每通道功耗仅 45mW。有 2 个报告和扫描芯片相关，其中微结构激光阵列光束控制研究（张冶金，中科院半导体所）介绍了通过在常规的半导体激光器中引入合适的周期表面微结构的技术，成功实现微结构半导体激光器阵列，通过调制周期微结构实现了低至 0.88° 的垂直发散角，通过激光器阵列的轮询注入实现了 41.5° 的大范围扫描。全固态光束扫描 OPA 芯片（张肇阳，浙江大学）介绍了三种不同性能 OPA，采用载流子扩散机制的高速调控 OPA；采用色散机制 OPA，通过改变波长实现二维扫描；采用大规模 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-on-Si 阵列波导，实现低发散角 OPA（256 阵列，0.154° x 0.0435° 光束发散角）。氮化硅集成光子器件和工艺（杨妍，中科院微电子研究所）介绍了氮化硅工艺平台，面向无源光子芯片，采用 LPCVD 工艺，并利用“分步淀积+退火”获得了大于 400nm 厚度的氮化硅薄膜，波导损耗约 0.5dB/cm，并制备了光耦合器、波导交叉器、功率分束器、波分复用器等光子器件。

## 2. 主要观点

- 1) 目前激光雷达的发展正在由传统机械式走向半固态集成，直至最后到全固态芯片化。激光雷达以探测技术分类可分为直接时间飞行模式（dToF）和连续调频模式（FMCW）两种，分别采用时间差和频率差来控制物体距离。按照扫描方式可以分为无扫描闪光方式、一维扫描方式、二维 MEMS 扫描方式、全固态光相控阵扫描方式等。
- 2) FMCW 集成激光器的研究处于起步阶段，在下一代激光雷达的应用上逐步清晰，针对大调频带宽、高线性度等指标还有很大提升空间，芯片工程化需满足车载应用；VCSEL 芯片产业发展迅速，特别是针对激光雷达应用的阵列化和高功率的相关技术不断取得进展。
- 3) 对比国外，我国在 InP 基 APD 方面的研究还有差距，针对高灵敏度低噪声 APD，主要研究路径包括采用低离子化系数 k 倍增材料；利用级联倍增层调控载流子动能；集成负反馈机制，提高淬灭速率，以及与 ROIC 电路实现 3D 集成。
- 4) 芯片化扫描器也是实现全固态激光雷达最具挑战的光电集成芯片，目前技术方案依然不成熟，技术路径多样，包括光相控阵调控波束（OPA）、轮询开关调控波束等。
- 5) 支撑光芯片开发的基础工艺也很重要，包括硅/氮化硅波导加工工艺。激光雷达是一个复杂的光电系统，为了将激光器、探测器、扫描器以及相关电芯片混合集成，并满足车规级应用，光电集成封装技术将是很大挑战。

### 3. 发展建议

一方面以产业需求为牵引，助力产业快速提升，例如进一步研究车规级的光电芯片，满足车载条件下工作的要求；建立车规级光电封测平台，助力车载光电芯片发展。

另一方面构建下一代全固态激光雷达技术优势，突破核心芯片关键技术，例如研究 FMCW 光源的窄线宽、大调频带宽、高线性度指标同时满足的难题；研究高灵敏度低噪声探测器芯片和阵列；针对全固态光扫描器，研究大扫描视场、低发散角光束、高精密光束调控和低光损耗集成光芯片技术。



## 专题 15：光传感

薛晨阳（中北大学）、朱涛（重庆大学）

### 1. 专题简介

光传感技术的研究始于 20 世纪 60 年代。其多以石英光纤或塑料光纤作为光的传输媒介，利用外界环境物理量与光场的直接或间接耦合，使得光在光纤中传播的波长、光强及相位等特征物理参量发生改变，从而对外界物理量进行传感测量。

光传感技术由于具有灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、便于组网等优势，在交通运输、能源开采、石油化工、设备监测、生物医疗、环境监测等领域，诸如旋转、压力、应变、加速度、噪声、温度、气体等光学传感器具有迫切的应用需求。同时，光传感技术具有在高温高压等恶劣环境下应用的潜力，可以满足在航空航天、武器装备等领域的一些迫切的测试需求。

本专题共有 8 篇特邀报告和 1 篇口头报告，包括：集成纳米结构的 MEMS 光学传感器（毛海央，中科院微电子研究所）、面向 pH 检测和生物成像的纳米硅荧光传感（刘玉菲，重庆大学）、Phase noise dynamics in soliton microcombs (Fuchuan Lei, Chalmers University of Technology, Sweden)、On-chip spectrometer based on lithium niobate modulator (Gaoyuan Li, ETH Zurich, Switzerland)、悬浮光机械系统及其惯性传感应用（肖定邦，国防科技大学）、极端环境光学微纳结构的原位传感器件及测试技术（郑永秋，中北大学）、飞秒激光螺旋扫描及并行逐点制备蓝宝石光纤光栅高温传感器（于永森，吉林大学）、相干光时域反射系统性能提升研究（靳宝全，太原理工大学）、A photoelectric integrated chip based on photodiode-body-biased MOSFET with high gain up to  $10^7$ , wide dynamic range over 160dB, and broadband spectrum response from 254nm to  $1.3\mu\text{m}$ （高超，中山大学）。

### 2. 主要观点

- 1) 在高温传感方面：德国柏林理工大学开发出能在  $800^\circ\text{C}$  下应用的声传感器，是光纤声传感器中工作温度较高的器件。此外，蓝宝石晶体由于具有高熔点，被认为是制备高温光学传感器的理想材料之一。德国莱布尼兹光子技术研究所、吉林大学、中北大学、深圳大学、重庆大学等国内外研究团队通过在蓝宝石光纤上制备布拉格光栅或基于蓝宝石光纤制作光纤干涉器件，实现了  $1800^\circ\text{C}$  以上的温度测试，但离工业化成熟应用还有一段距离。
- 2) 在多物理量传感方面：英国的 Oxsensis 公司从 2005 年开始研制基于蓝宝石-法珀腔干涉

原理的光纤式高温压力传感器，已从单一测压传感器产品发展到多参量测试系统，可同时测量压力、温度、振动、流量、噪声等参数，该公司的温度、压力、振动产品的工作温度均达到 1000℃。国内的吉林大学、中北大学、厦门大学和重庆大学均有开展高温恶劣环境下多参量传感器研究，研究成果已在我国航空航天、核工业环境等领域得到了初步应用。

### 3. 发展建议

- 1) 微型化方面，建议探索耐高温材料的微结构加工，促使传感器结构进一步向微型化工艺发展。单芯光纤的传感技术已成为发展趋势，全光纤传感头的体积小且工作可靠，所以采用飞秒的微结构加工、微型 3D 打印技术在制备微型的传感结构方面具有独特的优势。由于目前光纤之间的熔接损耗极小，且光纤之间的粘接技术和光纤端面抛光、镀膜等相关技术等都已逐渐成熟，采用异质材料的集成微型结构也可以进一步提升传感器性能。
- 2) 多参量集成传感方面，建议优先促进多参量传感器的一体化集成研究，从多参量的解耦算法研究入手，进一步提升多参量传感器的测试精度。多参量集成传感同时测量多个物理量既减少测试装置的数量和复杂程度，又可避免不同传感器相互之间的影响。此外，基于大数据的 AI 驱动也是集成传感需要尽早布局的方向。
- 3) 极端恶劣环境应用方面，建议尽快构建极端恶劣环境下的传感测试体系，加强蓝宝石等材料的尖端工艺研究与传感器制备工艺研究，推动光传感技术在恶劣环境下的优势应用。高温环境下物理参量的传感技术在精密工业发展中也起着举足轻重的作用，是现代传感技术的研究难点。建议加强力量发展耐高温光学材料、蓝宝石结构一体化高温传感等方面的研究，推进光学耐高温传感器在航空航天、武器装备和精密工业等领域更广泛的应用。

## 圆桌论坛：大规模集成芯片：光电融合

肖希（国家信息光电子创新中心）、苏翼凯（上海交通大学）

### 1. 专题简介

“光电融合”是一种更高层次的光电子与微电子一体化集成技术，它代表着光子功能和电子功能的协同联动，使信息感知、信息传递、信息处理的效能大幅提升，甚至可能产生颠覆性的效果。

从连接/传输、路由/交换和计算/处理三方面来说，面对信息化在速率、容量、带宽、时延和能耗等维度不断攀升的要求，亟需研究变革性的光电融合芯片技术，以探索通信系统和信息系统的提速、扩容和多功能集成的突围路径。

本专题围绕光电融合的关键技术、行业应用和发展趋势进行了讨论，共有4位报告人，包括面向超算/数据中心的新一代光电融合需求及发展趋势（罗章，国防科技大学）、112G波特率硅光发射机（李科，鹏城实验室）、信息光电融合：概念与挑战（谭旻，华中科技大学）、光电闭环的光学参数精准调控（李乐良，中科院半导体所）。

### 2. 主要观点

- 1) 硅基光电子集成芯片是微电子与光电子相融合的产物，也是推动两个产业持续发展的最佳解决方案。目前，硅基光电子集成芯片已建立起商用化设计仿真软件、晶圆厂、封装厂和系统集成的产业基础，并在光传输、光互联、光计算和光传感等领域取得重要应用。然而，硅基光电子集成芯片方案尚未成熟，无法充分发挥光电融合的技术优势。
- 2) 从技术发展来看，主要瓶颈问题体现为：
  - （1）速率上，受限于硅材料较慢的载流子输运速率，硅光器件带宽典型值为30~40GHz，难以满足未来超100Gbaud通信速率的需求；
  - （2）功耗上，受限于硅材料较弱的电光效应，硅光芯片需适配功耗较高的驱动放大电路，所需功耗高达10pJ/bit量级，难以大幅降低；
  - （3）集成规模上，现有硅光器件尺寸大（调制器达数mm量级），单片集成光器件数量最高只有1k-10k个，集成规模远远落后于微电子芯片；
  - （4）光电封装及调控技术不完善。未来硅光片上系统的光学和电学接口数量将超过现有光电子芯片的100倍以上，既要实现高频、高密度、低串扰的光学/电学连接，还要保障整体性能及可靠性，为光电封装技术带来极大挑战。亟需研究光电融合整体布局与封装方法，并探索其系统调控技术，补偿工艺偏差、温度、串扰等随机因素影响。

3) 从产业基础来看，主要问题有：(1) 缺乏适用于大规模集成的光电子元器件的完整体系。目前，光电子元器件研究大多属于单点突破，缺乏整体统筹，在性能、功耗和尺寸等方面难以适应大规模集成发展需求。因此，亟需从片上系统需求出发，基于结构和工艺兼容性，研制一系列更小尺寸、更低功耗、更高性能、更大容差的元器件，并形成下一代硅光元器件库。(2) 光电子集成芯片制备工艺能力和基础积累薄弱。我国硅光器件及芯片的材料生长、加工精度、良率控制、芯片可靠性等方面存在不足，工艺研发能力和人才储备较为薄弱。亟需发展支撑硅光芯片研发、中试和产业化的工艺平台，在硅基异质集成、硅基光电集成等工艺方面开展深入研究。(3) 光电子集成芯片架构及设计自动化能力不足。光电协同设计方法、开发工具、集成工艺、芯片架构尚处于起步阶段。随着光电子芯片的复杂度日益增长，芯片架构设计的重要性日益凸显。亟需探索光电子集成芯片的创新架构，开展光电融合仿真和设计自动化软件开发。

### 3. 发展建议

- 1) **构建适用于大规模光电子集成芯片的元器件库。**需通过新材料、新结构、新工艺的研究，全面开发更适合大规模集成的新一代光电器件，并逐渐建立完整的光电器件数据库，以支撑未来更大规模，更复杂的集成芯片设计和制作。
- 2) **加强光电子集成芯片的工艺能力和基础积累。**虽然由于光的特殊物理性质，光芯片不要求28nm 甚或7nm 的高精度工艺线，但其对工艺的稳定性和一致性要求更加苛刻。因此，积极推进工艺线研发和工艺人才储备，建立能够支撑光电子集成芯片研发、样品试制和批量生产的稳定工艺线，是提高我国自主芯片制造能力的必经之路。
- 3) **强化光电子集成芯片的架构设计能力。**大规模光电集成必然包含了非常多数量和种类的光子和电子器件，需要通过合理的布局设计将它们良性结合在一起，以获得最优的芯片性能。此外，不断提升光电子集成芯片的自动化设计能力，并开发针对性的建模、仿真与设计工具，也是光电子集成技术发展的重要环节。
- 4) **增强光电子集成芯片的封装技术。**对于未来高度集成的光电芯片，其光学和电学接口数量预计将是现有光电子芯片的100倍以上。因此研究芯片与封装中的光电融合技术以及整体布局，探索具有自动优化功能的封装技术和封装工艺，是为光电子集成芯片的商业发展提供产业支撑的关键问题。

## 审查专家（音序）

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 安正华 | 黄玲玲 | 潘时龙 | 王剑威 | 张宝顺 |
| 蔡艳  | 黄卫平 | 任希峰 | 王健  | 张华  |
| 曹良才 | 黄治同 | 阮昊  | 王琼华 | 张惠敏 |
| 陈宏伟 | 江伟  | 桑新柱 | 王兴军 | 张继军 |
| 陈林森 | 金贤敏 | 沙威  | 王雪  | 张靛  |
| 陈明华 | 雷继兆 | 沈世奎 | 王宇  | 张靖  |
| 陈岐岱 | 李国强 | 沈亦晨 | 王云才 | 张亮  |
| 陈伟  | 李俊杰 | 宋健  | 吴南健 | 张启明 |
| 陈向飞 | 李良川 | 宋志刚 | 吴远大 | 张峭峰 |
| 陈雄斌 | 李泠  | 苏辉  | 伍剑  | 张冶金 |
| 陈章渊 | 李明  | 苏晓龙 | 肖希  | 张永  |
| 迟楠  | 李王哲 | 苏翼凯 | 谢亮  | 赵复生 |
| 戴道铤 | 李向平 | 孙力军 | 谢长生 | 赵佳  |
| 董晓文 | 李志华 | 孙敏  | 徐江涛 | 赵励  |
| 董毅  | 刘昌举 | 孙琼阁 | 徐平  | 赵毅强 |
| 段炼  | 刘丰满 | 谭庆贵 | 许秀来 | 郑臻荣 |
| 范静涛 | 刘进  | 谭小地 | 薛晨阳 | 周林杰 |
| 冯俊波 | 刘向南 | 汪莱  | 严群  | 周涛  |
| 傅焰峰 | 刘晓明 | 汪伟  | 杨林  | 周田华 |
| 龚晨  | 刘宇  | 王安帮 | 杨清波 | 周小计 |
| 郝群  | 陆睿  | 王春晖 | 杨妍  | 朱涛  |
| 郝智彪 | 罗勇  | 王东  | 于思源 | 朱樟明 |
| 何建军 | 马仁敏 | 王光绪 | 于永森 |     |
| 胡辉勇 | 宁永强 | 王会涛 | 余明斌 |     |
| 胡小永 | 潘教青 | 王建伟 | 曾理  |     |