



综述

迈向“光载信息”时代

李嘉荣^{1,2,3}, 丁文伯^{1,2,3}, 杨昉^{4,5}, 董宇涵^{1,2,3}, 宋健^{1,2,4,5}, 张晓平^{1,2}

1. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;
2. 深圳市泛在数据赋能重点实验室, 广东 深圳 518055;
3. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055;
4. 清华大学电子工程系, 北京 100084;
5. 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

摘要: 光载信息指利用光(光子)而非电(电子)进行通信、感知、计算和显示, 其具有低功耗、大带宽、高速率、高抗干扰性和高安全性等优势。基于此, 探讨了光载信息技术的核心组成, 包括材料、器件、子系统及应用。首先, 介绍其基本概念、发展历程及行业现状。接着, 分析光载信息材料的分类及其在器件中的应用要求。随后, 阐述关键器件如发射器、光传感器、显示器件及关键芯片, 探讨器件间的融合与协同。最后, 总结光载信息子系统的集成与应用, 重点介绍无线光通信、光感知、光计算和光场显示等方向, 并列举6G通信、智慧城市和智能制造等典型应用。未来, 光载信息技术将在更广泛领域发挥重要作用。

关键词: 光载信息; 光通信; 光感知; 光计算; 光显示

中图分类号: TP209

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025161

Stepping into the era of opto-photonics information

LI Jiarong^{1,2,3}, DING Wenbo^{1,2,3}, YANG Fang^{4,5}, DONG Yuhan^{1,2,3},
SONG Jian^{1,2,4,5}, ZHANG Xiaoping^{1,2}

1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China
2. Shenzhen Ubiquitous Data Enabling Key Lab, Shenzhen 518055, China
3. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China
4. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

收稿日期: 2025-04-13; 修回日期: 2025-05-23

通信作者: 丁文伯, ding.wenbo@sz.tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2024YFB3816000); 广东省科技厅“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(No.2021ZT09L197); 深圳市科创委重点实验室筹建启动项目(No.ZDSYS20220527171406015); 深圳市科创委基础研究(面上项目)(No.JCYJ20220530143013030); 清华大学深圳国际研究生院鹏瑞青年教师启航计划项目(No.SZPR2023008); 清华大学深圳国际研究生院鹏瑞冠名教授计划项目

Foundation Items: The National Key Research & Development Program of China (No.2024YFB3816000), Guangdong Innovative and Entrepreneurial Research Team Program (No. 2021ZT09L197), Shenzhen Ubiquitous Data Enabling Key Lab (No. ZDSYS20220527171406015), Shenzhen Science and Technology Program (No.JCYJ20220530143013030), Tsinghua Shenzhen International Graduate School - Shenzhen Pengrui Young Faculty Program of the Shenzhen Pengrui Foundation (No.SZPR2023008), Tsinghua Shenzhen International Graduate School-Shenzhen Pengrui Faculty Program of the Shenzhen Pengrui Foundation



5. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China

Abstract: Opto-photonics information refers to the use of light (photons) instead of electricity (electrons) for communication, sensing, computing, and display, offering advantages such as low power consumption, high bandwidth, high speed, strong anti-interference capability, and high security. Based on this, the core components of opto-photonics information technology, including materials, devices, subsystems, and applications, were explored. Firstly, its fundamental concepts, historical development, and industry landscape were introduced. Then, the classification of opto-photonics information materials and their application requirements in devices were analyzed. Next, key devices such as emitters, optical sensors, display devices, and core chips were discussed, along with their integration and synergy. Finally, the integration and application of opto-photonics information subsystems were summarized, focusing on wireless optical communication, optical sensing, optical computing, and light-field display, while highlighting typical applications such as 6G communication, smart cities, and intelligent manufacturing. In the future, opto-photonics information technology is expected to play a crucial role in a broader range of fields.

Key words: opto-photonics information, optical communication, optical sensing, optical computing, optical display

0 引言

随着信息技术的飞速发展，我们正步入一个以光载信息为核心的新时代，从依赖电子（电子信息）到依赖光子（光子信息），预示着信息技术的又一次革命^[1]。光载信息是指以光（光子）而不是电（电子）为主来实现信息的通信、感知、计算、显示并赋能各领域的相关应用。其主要优点是低功耗、大带宽、高速率、高抗干扰性、高安全性等^[2]。以可见光通信为例，其单链路通信速率已突破 10 Gbit/s^[3]，空间激光通信系统可实现 1 Tbit/s 以上传输^[4]；在光计算方面，硅光子芯片的单位比特能耗可低至 1 pJ/bit 以下，显著优于传统电子计算结构^[5]。这些性能优势为光载信息在未来大带宽、低时延、绿色计算等应用中奠定了技术基础^[6]。光载信息的核心是新型的光学材料、高性能的光学器件、先进的通信/计算等信号处理技术，以及面向实际应用需求的系统集成^[7]。光载信息中的“光”是信息载体，而“信息”涵盖感知、获取、传输、存储和计算等全生命周期的信息；“载”强调光电融合与相互作用的深层含义。未来，光载信息产业将作为信息基础设施发挥作用，其基本能力应至少包括通

信、感知和计算，这也是未来信息网络的必备能力。此外，在“显示”和“健康”等应用领域，与常规射频无线电技术相比，光已展现作为信息载体的独特优势，需要加以重视并充分利用^[8]。“感通算显康”一体化并非 5 种能力的单纯叠加，而是借助灵活、有机的结合，形成新的产品形态，支持新的应用场景，进而产生新的业态。譬如，支持车的照明系统从安全照明向“感通显照”智能化升级，为智能交通、无人驾驶提供信息化支撑。

与光载信息相关技术的发展可以追溯到 20 世纪初，从那时起科学家便开始探索光的物理特性及其在信息传输中的潜力^[9]。自光纤通信在 20 世纪 70 年代崛起，光载信息技术就已成为数据传输的重要方式^[10]。随着时间的推移，特别是在 21 世纪，这项技术经历了飞速的发展。新型光学材料和器件技术的进步，如新型光子晶体^[11]、量子点^[12]和各类微纳光学器件的研发，极大地推动了光载信息技术的实用化和产业化。这些技术的进步不仅有效提升了信息传输的速率和效率，还显著降低了能耗。

当前，光载信息技术已成为多个领域的技术支柱，在不同行业和产业的应用也日益增多，特

别是在 5G 通信、人工智能、物联网等领域展现出巨大的潜力和价值^[13-14]。在通信行业，光通信技术已成为数据传输的主流方式，尤其在长距离和大容量传输方面展现显著优势^[15]。在信息处理和计算领域，光计算和光子芯片的研发正成为高性能计算和人工智能领域的热点^[16]。除此之外，光载信息技术在医疗健康、汽车制造、航空航天等多个领域中也发挥着重要作用。然而，现阶段光载信息技术从实验室走向规模化部署仍面临一系列挑战，包括光电器件集成复杂度高、系统互操作标准尚不统一，以及软/硬件架构难以支撑“感通算显康”一体化的工程闭环^[17-18]。学术界正在探索如“光子-电子混合架构”“一体化光神经网络”“集成 VLC 与传感芯片”等多路径解决方案，而产业界则推动标准体系、接口协议和场景落地的融合式迭代^[19-20]。

随着光载信息技术的突破和应用的拓展，中国政府高度重视并支持相关产业的发展。《“十三五”国家科技创新规划》指出，要大力发展超高速光通信、可见光通信和光电子技术，推动技术与各行业融合。科学技术部“十四五”专项指南将信息光子技术和光电混合 AI 计算芯片等定为研发重点，展示了对相关技术的战略布局。同时，深圳市也将光载信息产业列为“20+8”未来产业之一，反映了对其发展的重视。通过研发资

金支持、产业集群培育等措施，促进光载信息技术创新和产业化，建立全产业链，推动和保持地区乃至全国在相关领域的领先地位。尽管如此，光载信息技术的产业化进程仍面临诸多挑战，如高成本、技术标准化和兼容性问题等^[21]。在政策支持、技术持续进步和成本进一步降低的背景下，光载信息技术有望在更多的行业和产业中得到广泛应用，推动信息技术体系的迭代升级。

光载信息的材料、器件、子系统和应用场景如图 1 所示。本文着重对新型光载信息材料、光载信息关键器件、光载信息子系统、光载信息应用等进行详细论述。

1 新型光载信息材料

1.1 材料的分类

随着光载信息技术的快速发展，新型光载信息材料的研究和应用变得愈发重要。这些材料在提高器件性能、降低能耗、增强系统稳定性方面发挥着重要作用^[22]。其发展经历了从第一代硅基和锗基材料到第二代化合物半导体，再到第三代宽带半导体材料的演变，且每一代半导体材料的出现都标志着技术的重大进步和新应用领域的开拓^[23]。不同代际光学半导体材料对比见表 1。

第一代半导体材料主要以单质半导体为代表，以硅 (Si) 和锗 (Ge) 为核心^[24]，为早期电

表 1 不同代际光学半导体材料对比

半导体材料代际	代表材料	特点	应用场景	优缺点	改进方向
第一代	Si、Ge	窄带隙，适用于基本逻辑电路和初步光电转换	早期晶体管、二极管、中功率光电传感器、太阳能电池	Si 储量丰富、绝缘性能好，Ge 耐高温，但二者在高频光电子器件应用中受限	发展高效率光电转换技术
第二代	GaAs、InP、InSb、AlGaAs、InGaAs	带隙较宽，适用于制作发光和高速光电子器件	高速、高频率器件、激光器、发光二极管 (LED)、可见光通信 (visible light communication, VLC) 等	高电子迁移率、光电效率高，但材料稀缺、成本高、处理复杂	发展新型低成本制造技术和光电集成技术
第三代	GaN、SiC、ZnO、金刚石、AlN	宽带隙，高热导率，适合高功率光电子和光源器件	半导体照明、激光显示、高功率光电子、光通信等	优异的热稳定性、辐射能力和宽带隙，但应用范围和成本是挑战	提高材料制备技术，降低成本，拓宽应用场景

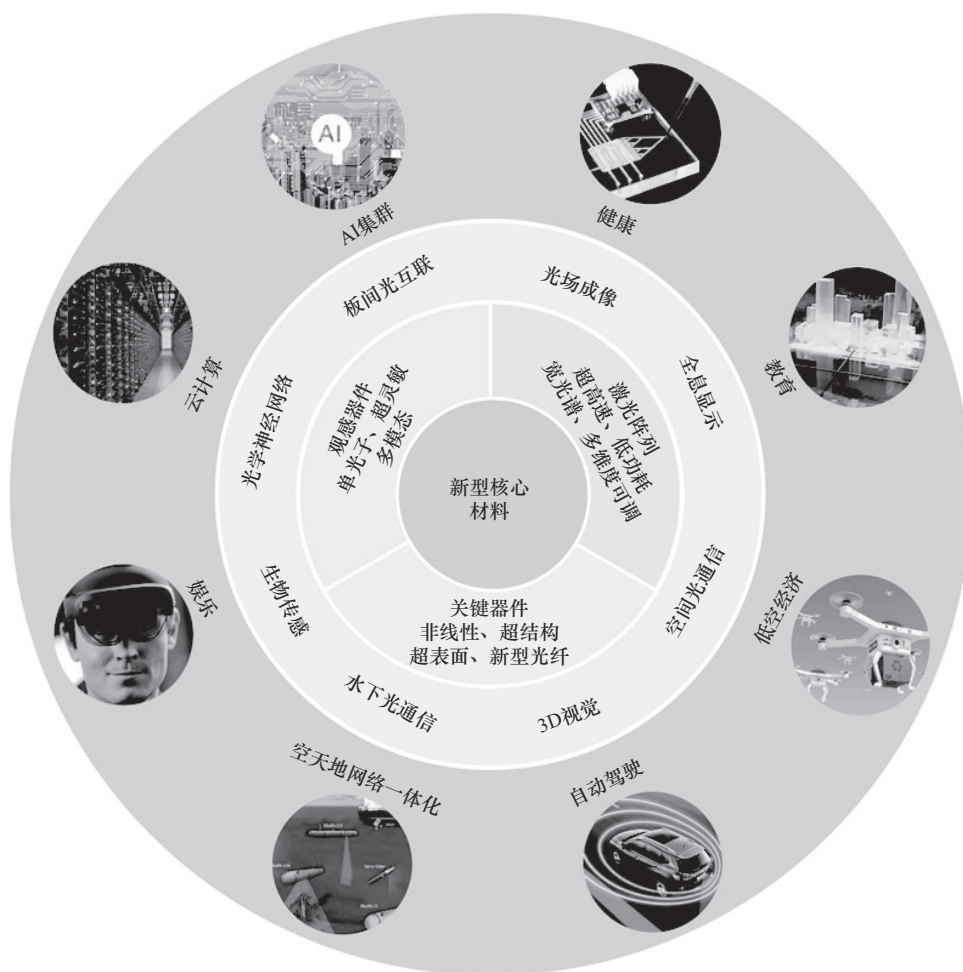


图1 光载信息的材料、器件、子系统和应用场景等

子工业提供了基础。Si材料凭借其丰富的储量、成熟的加工技术和优异的电性能优势，是制造微处理器和内存芯片的首选，且在太阳能电池和光电检测器领域也显示出广泛的应用潜力。锗因其在红外探测、光电子领域的优异性能而受到重视。

第二代半导体材料主要由化合物半导体^[25]，如砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）、铟化铟（InSb）、铝镓砷（AlGaAs）、铟镓砷（InGaAs）构成。这些化合物半导体因其出色的光电特性和高载流子迁移率，在高速通信和光电子领域得到广泛应用。特别是InP^[26]，以其优越的光电转换效率而著称，是制造高性能激光发射器和光传感器的理想材料。这些化合物半导体能覆盖更广泛

的波长范围（从红外到紫外），但生产成本相对较高，阻碍了其更广泛的应用。

第三代半导体材料代表了半导体技术的最新进展。它们主要是宽带隙半导体^[27]，如氮化镓（GaN）、碳化硅（SiC）、氧化锌（ZnO）和氮化铝（AlN）。相较于第一代和第二代半导体材料，这些材料在高温、高压和高频应用中展现出更卓越的性能。特别是GaN^[28]和SiC^[29]，因其宽带隙、高热导性和强电场阈值，在光通信和计算等领域展现显著优势。GaN以其高电子迁移率和宽带隙特性，在高速光通信系统、先进的光网络基础设施，以及光电调制器中发挥着重要作用，能显著提高信息传输的速率和效率。SiC因其能够承受高电压和高温的优异性能而在光电隔离器、

高性能光传感器和下一代光伏技术中成为首选，展现了其独特的价值。同时，SiC 的化学稳定性和高热稳定性，使其在恶劣环境下仍能保持性能的稳定，这一优势对于保证太空探测和卫星通信系统的可靠性至关重要。

虽然不同代际半导体材料在应用和性能上存在显著差异，但它们都展现出在推动技术创新和满足先进应用需求方面的共性。硅基和锗基材料以其成熟的加工技术和广泛的应用优势而占据主导地位，但在光电转换效率方面存在局限。化合物半导体（如 InP）提供了更好的光电特性和更广泛的波长应用范围，但面临着制造成本高和工艺复杂的挑战。相比之下，第三代半导体材料（如 GaN 和 SiC）则在高频、高温和高功率应用中表现出色，但其制造难度和高成本仍然是主要的挑战^[28]。这些材料的应用与发展不仅对半导体行业产生了深远影响，也为光载信息技术的未来开展辟新的可能性^[27]。随着制造技术的不断进步和成本的降低，这些材料在未来的光载信息技术中将发挥更加重要的作用。

1.2 不同器件对材料的要求

光载信息技术的变革和进步，在一定程度上取决于其核心器件所使用材料的改进^[22]。这些材料的提升影响着器件的性能，包括效率、可靠性和长期稳定性等，从而决定了整个光载信息系统

的综合表现^[23]。为了更好地展现不同器件对材料的具体性能需求，及材料在工程应用中的适配性与实际挑战，系统对比了不同器件的代表性材料、工程特性及典型应用场景等，具体见表 2。

在发射器中，材料需要满足高效的光电转换性能、稳定性和长期可靠性等要求。对于半导体激光器和发光二极管（light emitting diode, LED）等发射器，常用的材料包括 GaAs、InP 和 GaN^[41]。这些材料具有良好的电子和光学特性，使得它们在不同波长范围内都能有较高的发光效率。高品质的发射器材料不仅能提高光源的亮度和效率，还能降低能耗和散热要求。

光传感器材料选择的关键在于高灵敏度、快响应时间、宽宽带响应范围以及高探测率。Si 因其优秀的性价比、与互补金属氧化物半导体（complementary metal oxide semiconductor, CMOS）工艺的兼容性，被广泛应用于波长 400~1 100 nm 的光传感器。对于更宽波长范围，如红外或紫外探测，碲化镉（CdTe）和硫化铅（PbS）等材料则被广泛研究^[42]。这些材料具有高灵敏度和快速响应的特性，适用于高速光通信和精密测量。

用于显示器件的材料需要具备高光电转换效率、高色彩还原度和长期稳定性。有机发光二极管（organic light-emitting diode, OLED）中，有

表 2 不同器件的代表性材料、工程特性及典型应用场景等

器件类型	关键性能参数示例	代表性材料	波长/频率适用范围	工程优势	工程挑战	典型应用场景
发射器	外量子效率（external quantum efficiency, EQE）> 50%、调制速率（>1 Gbit/s）、热稳定性好、功耗低 ^[30-31]	GaAs、InP、GaN	850 nm（GaAs） ^[32] ；1 300~1 550 nm（InP） ^[33] ；可见光（GaN） ^[34]	发光效率高，频率范围广	成本较高，封装/散热要求高	光纤通信、VLC、空间激光通信、LiDAR
光传感器	探测率 > 1×10 ¹² Jones、噪声等效功率（noise equivalent power, NEP）< 10 ⁻¹² W/Hz ^{1/2} 、响应时间 ns 级、带宽大 ^[35-37]	Si、InGaAs、PbS、CdTe	Si: 400~1 100nm ^[38] ；InGaAs/PbS: >1 100nm ^[39]	CMOS 兼容性强（Si）、红外灵敏度高（InGaAs）	红外材料价格高、热稳定性差（PbS/CdTe）	图像感知、光接收器、红外遥感
显示器件	亮度（OLED: 500~1 000 nits；MicroLED/QD: >1 000 nits）、色域（Rec.2020 >90%）、响应时间 μs 级 ^[40]	OLED、MicroLED、QD	可见光全域	色彩鲜明、亮度高、响应快	成本高、制备复杂（QD/MicroLED）	消费电子、AR/VR、医学成像、车载显示



机材料（如聚合物和小分子）被用作发光层，因其可以提供鲜艳的颜色和高对比度^[43]。量子点（quantum dot, QD）显示技术也在显示领域崭露头角，它通过调整量子点的尺寸来精确控制发光颜色，从而实现更广色域和更高色彩饱和度的显示效果^[44]。

这些材料的发展不仅提升了各自器件的性能，也促进了光载信息技术整体的进步。

2 光载信息关键器件

2.1 关键器件

光载信息技术的核心功能器件包括发射器、光传感器、显示器件等，在光信号的生成、检测、处理和显示等方面起着至关重要的作用^[45]。这些关键光电器件的性能决定了整个系统的效能，如数据传输的速率、系统的可靠性和能源效率，也为“感知”“通信”“计算”等功能模块间彼此赋能，在综合提升系统整体性能方面起着决定性作用^[16]。

发射器在光载信息系统中用于产生光信号。发射器通常基于LED和激光二极管两类光源，负责生成光信号。激光发射器以其高方向性和高能量密度的特性，在精确测量、数据通信和医疗应用中发挥着关键作用^[46]。现代激光发射器技术正向着更小型化、更高效率和更低能耗的方向发展，这包括半导体激光器、固体激光器以及光纤激光器等多种形式。

光传感器负责接收光信号并将其转换为可用的电信号。这些器件在光通信、遥感和成像等领域非常关键。高灵敏度的光传感器能够精确地检测微弱的光信号，而高速光传感器则用于快速的数据通信和信号处理^[47]。近年来，光传感器技术的发展主要集中在提高灵敏度、减少噪声以及扩大动态范围方面。

显示器件将光信号转换为视觉信息，是现代显示技术的核心。从传统的液晶显示到现代的

OLED和QD显示技术，显示器件的发展一直致力于提供更高的分辨率、更宽的色域和更佳的视觉体验。特别是在增强现实（augmented reality, AR）和虚拟现实（virtual reality, VR）技术中，高性能的显示器件至关重要。

感通照一体光源将感知、通信和照明功能集成在一起，是智能照明和物联网领域的新兴趋势^[48]。这种光源可以在提供常规照明的同时，进行数据传输和环境感知，如利用VLC技术实现高速数据传输^[49]。这些一体化的光源在智能家居和智慧城市的构建中具有广泛的应用前景。

光学超表面和非线性光学器件也是光载信息技术中的先进组件之一。光学超表面通过在微纳尺度上精密操控光波，实现了对光的高度控制，如光束整形、聚焦和波前调制等^[50]。非线性光学器件则利用材料的非线性特性进行频率转换、调制和放大等功能，这在高速光通信和光计算中尤为重要^[51]。

2.2 关键芯片

光载信息技术的核心芯片包括光子AI芯片、集成光电芯片和光互联芯片。光子AI芯片结合了光电技术与AI，通过模拟神经网络结构以光来进行数据处理和计算，提供超越传统电子芯片的速度和能效^[52]。这些芯片在处理大数据和复杂算法时展现出独特的优势，未来将在数据中心和自动驾驶等领域发挥重要作用。集成光电芯片则通过将多个光学功能集成在单一小型芯片上，如激光器和调制器，优化了光通信和光传感器的应用。随着制造技术的进步，集成光电芯片将在系统集成和性能方面持续取得突破^[53]。光互联芯片作为连接和管理光路径的关键组件，在高性能计算和大型数据中心中发挥作用，可提供高效、低耗能的数据传输方式，推动通信技术向更高带宽和更低能耗的方向发展^[54]。

2.3 器件融合与协同

器件融合与协同是实现高效光载信息系统的

关键因素之一^[45]。这一过程涉及将不同的光电器件（如光源、光传感器和处理单元）有效地组合在一起，以优化系统性能和降低成本。融合策略需要考虑器件之间的光学耦合、电气连接和热管理。良好的器件融合能够提高信号的质量和系统的稳定性，并简化系统设计和制造过程。例如，在集成光电芯片中，多种功能的集成不仅节约了空间，还增强了系统的性能和可靠性。协同工作是另一个重要方面。在复杂的光载信息系统中，不同器件之间需要精确协调，以保证系统整体的最佳性能。

3 光载信息子系统

3.1 子系统概述

光载信息子系统作为光载信息技术的重要组成部分，包括光通信、光感知、光计算和光显示等，其结构与关系如图2所示。这些子系统通过不同的方式利用光的特性实现相关的功能，共同构成多元且高效的光载信息应用系统。表3中总结了光载信息子系统的主要功能目标、性

能指标、典型架构/器件构成与代表性成果等，以更好地阐述各子系统的系统定位与关键技术能力。

(1) 光通信子系统

光通信子系统由多种光电器件组成，包括光源、调制器、传输媒介（如光纤和无线光通信媒介）、放大器和接收器等^[55-57]。光源，通常是激光器或LED，负责生成用于通信的光信号。调制器控制这些光信号以编码数据。在传输媒介方面，除了传统的光纤外，也涵盖了无线光通信技术，如可见光通信，它们通过空气或其他非导电媒介传输光信号。无论是光纤还是无线传输，放大器在传输过程中都是用于增强信号强度，而接收器（如光电传感器）则将接收到的光信号转换为电信号。这一子系统的主要功能是实现高速、高效率的数据传输。

(2) 光感知子系统

光感知子系统主要包含光学传感器或成像系统^[58]。光学传感器能够检测从物体反射或透射的光，以及光的其他属性，如强度、波长和偏振

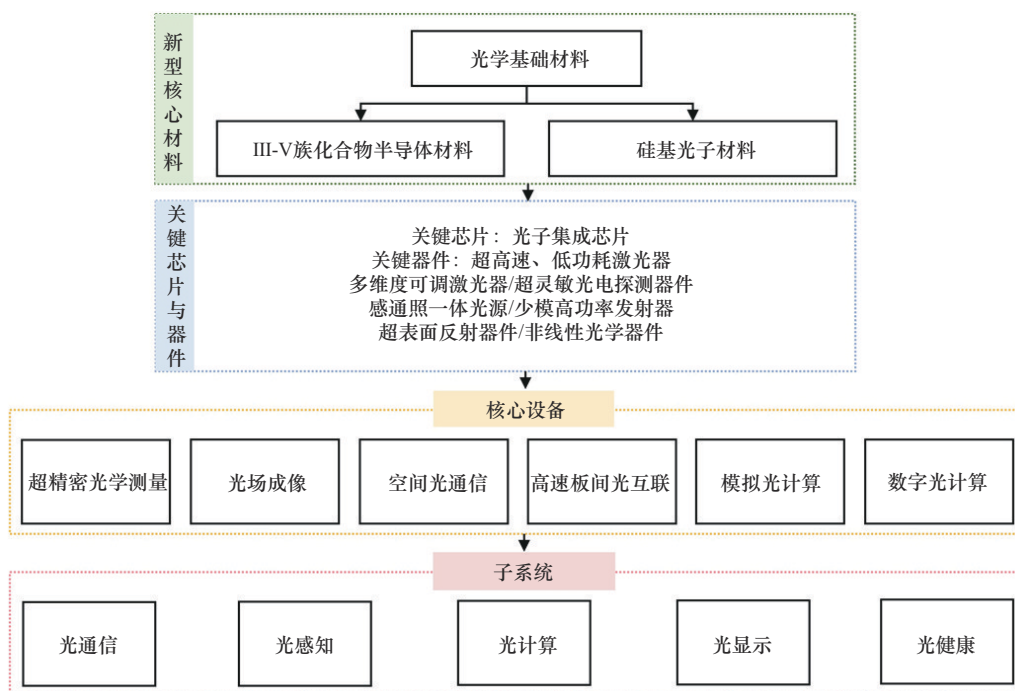


图2 光载信息子系统结构与关系



表3 光载信息子系统的关键性能指标、典型架构/器件构成与技术挑战

子系统	典型功能	关键性能指标示例	典型架构/器件构成	当前技术瓶颈	代表性成果
光通信	高速数据传输	速率 > 1 Gbit/s ^[64] , 误码率 < 10 ⁻⁹ ^[65] , 时延 < 1 ms ^[66]	LED/VLC 模块、自由空间光通信 (free-space optical communication, FSO) 激光链路、调制解调单元	对准精度差、器件散热难、调制带宽受限	室内 VLC 通信、卫星间激光通信
光感知	光场探测、环境感知	分辨率 > 1 MP ^[67] , 响应时间 < 10 ns ^[68]	CMOS 图像传感器、激光雷达、光谱传感阵列	多源融合困难、感知精度与实时性难平衡	自动驾驶激光雷达、健康光传感
光计算	光子信号处理与 AI 加速	运算速度 > 100 TOPS/W ^[69-70] , 时延 ns 级 ^[71-72]	光神经网络芯片、硅光矩阵、可编程干涉器	缺少高密度光电集成标准、软件工具链不成熟	光子神经网络、低功耗数据中心
光显示	信息可视化交互	亮度 > 1 000 nits, 刷新率 > 90 Hz ^[73-74]	MicroLED 阵列、OLED/QD 显示屏、光场投影模块	成本高、色域一致性差、分辨率与帧率矛盾	AR 眼镜、VR 头显、车载 HUD
光健康	生理参数监测、光学干预	心率监测误差 < 5 bpm ^[75-76] , 血氧测量误差 < 2% ^[77] , LED/激光功率密度 < 10 mW/cm ² ^[78-79]	多通道 LED/LD 光源、柔性 PPG 传感器、光谱分析模块、近红外光阵阵列	波长穿透深度受限、生理适配性与长期稳定性差、标准评估体系缺乏	智能手表 PPG 健康监测、低强度激光治疗、昼夜节律干预

态。成像系统则负责捕捉和记录图像数据。此外，该子系统还包括用于处理和分析传感器数据的数据处理单元。其核心功能是捕捉环境中的光学信息，将其转换为可用的数据。

(3) 光计算子系统

光计算子系统是一种利用光信号的物理特性进行信息处理和数据运算的新型计算系统^[59]。与传统的电子计算系统相比，它具有速度快、容量大、并行性强、功耗低等优势。具体来说，光信号的传输损耗低，可以实现更远距离的数据传输。同时，由于光信号之间不存在电磁干扰，光计算可以实现更高的并行度和数据吞吐量，提升了处理速度。此外，集成光电芯片能够将激光器、调制器、传感器等多种光学组件集成在单一芯片上，从而提高系统的紧凑性和效率^[60]。此外，光计算还能实现更低的能量消耗，对于构建更加节能的计算环境具有重要意义。光计算子系统具有广阔的应用前景，未来可应用于人工智能、大数据处理、科学计算、光通信、光存储等领域。

(4) 光显示子系统

光显示子系统主要包括处理器、显示源、控制电路和显示介质等^[61]。处理器负责处理和转换输入的信号。显示源如 LED、MicroLED、液晶

显示器 (liquid crystal display, LCD)、OLED、激光显示和 QD 等，负责产生图像。控制电路则负责调节显示参数，确保图像的准确呈现。显示介质决定了图像的显示方式，包括平板屏幕、投影系统或其他形式的显示技术。光显示子系统的核心功能是将光电信号转换为视觉图像，提供直观的视觉输出。在光载信息框架下，未来有望通过光计算技术使光显示子系统能够进行高速和复杂的图像和视频处理，而光通信技术则提供了高速且低时延的数据传输能力。这种技术的相互赋能可以提高光显示系统的整体性能，如增强其在高动态范围和高分辨率视频流的实时处理与显示能力，提高其在前沿应用中的竞争力。

(5) 光健康子系统

光健康子系统是基于光生物学效应构建的智能健康监测或干预系统。光健康子系统主要分为智能监测和医疗干预两大类。智能监测系统以符合人体安全标准的 LED 阵列或低强度激光作为光源，配合生物光学传感器接收装置，通过多光谱成像、光电容积脉搏波描记法 (photoplethysmography, PPG) 或反射光谱分析等技术，实现对心率、呼吸频率、血氧饱和度等生理参数的实时动态监测^[62]。医疗干预系统则基于生物体内源性光感受器的光子吸收与响应机制，通过特定波长光

辐射的选择性应用，靶向调控目标细胞的生理过程，从而实现了对特定疾病的治疗干预^[63]。光健康子系统未来在精准医疗、智能健康等领域具有重要的应用价值。

3.2 子系统的应用案例

光载信息子系统的应用案例展示了子系统在具体场景的功能和作用，包括光网络、光感知、光计算和光显示等。

光网络作为信息技术领域的一个重要基础设施，以其高速的数据传输能力和广阔的应用范围，正逐渐成为现代通信技术的核心之一^[80]。在光网络的众多实现方式中，光通信网络尤为关键，它通过光纤等传输媒介实现数据的高速传递，支持了全球互联网和大型数据中心之间复杂的数据流动^[60]。光通信网络的优势在于其能够提供超高的传输速度和巨大的带宽，满足了现代社会对数据传输速率和容量日益增长的需求。图3展示了光通信网络的不同应用场景及关系，包括星基网络、空基网络、陆基网络和g水下网络等。可见光通信技术作为光通信的新领域，通过LED灯发出的光信号传输数据，为室内通信、定位和

网络连接提供了一种创新的解决方案^[81]。VLC利用LED灯作为数据传输的媒介，通过调制光的强度来传输信息，这使得光源既能提供照明功能，又能作为数据传输的渠道。例如，在一些购物中心中，VLC技术被应用于顾客导航系统，通过顾客的智能手机与LED照明系统交互，向顾客提供店铺位置、促销信息和自定义推荐^[82-83]。这种应用不仅提升了购物体验，也为零售商提供了与顾客互动的新方式。VLC网络因其在室内定位精度高和数据传输安全性方面的优势，正逐渐成为智慧建筑和室内通信的重要技术。同时，VLC与射频（radio frequency, RF）^[81,84-85]或电力线通信（power line communication, PLC）^[86-87]的混合系统正成为研究热点，多个研究聚焦于其可达速率、能效最大化及多用户接入性能等方面，展现出良好的扩展性与实际可行性。在空间通信领域，空间激光通信正逐步成为地球静止轨道、中低轨卫星与地面之间构建高速链路的重要技术路径^[88]。其核心优势在于不受频谱资源限制，具备良好的抗电磁干扰能力和高信号聚焦度^[89]。空间激光通信系统一般由窄波束激光发射器、精密跟

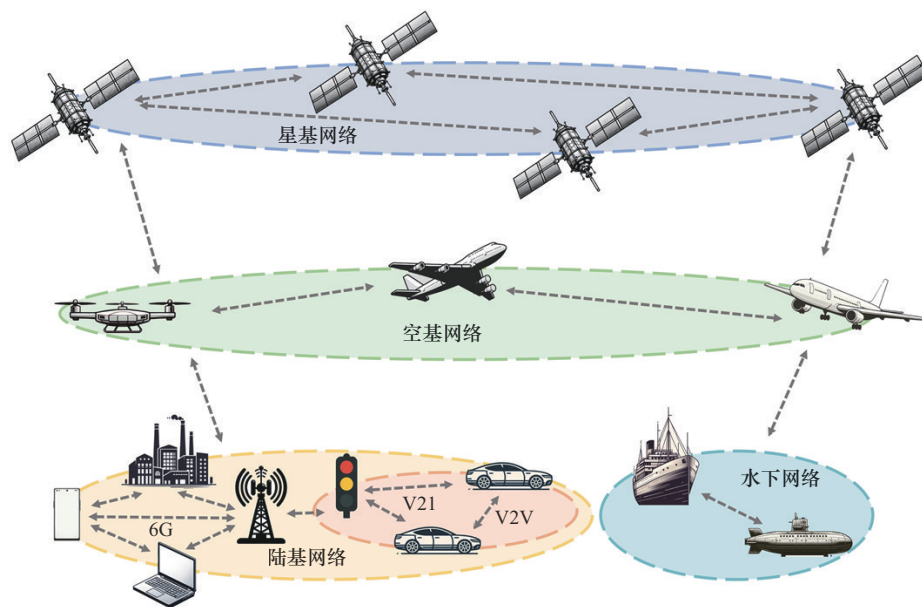


图3 光通信网络典型应用场景



踪模块和高灵敏探测器组成，依托大气通道实现端到端的大带宽、低功耗点对点传输，广泛应用于卫星通信、地空链路等场景^[90]。近年来，这项技术已在卫星中继和天地一体化信息网络等领域进入实际应用阶段，大幅提升了星地间大容量数据的传输效率^[91]。自供能光通信则适用于电源部署受限、系统功耗要求极低的边缘场景。该类系统利用环境能量驱动通信节点，不需要传统电池或外部供电，即可实现光信号的生成、调制与接收，具备高鲁棒性、低维护成本与优良的环境适应性等优势。其核心思想在于打破“通信=耗电”的传统范式，直接利用机械能（如敲击、震动、摩擦）或光能（如太阳光）实现通信模块的能量自洽运行^[92]。例如，将摩擦电纳发电机集成至发射端，可将机械扰动转化为脉冲电信号，驱动LED发光，实现信号的调制与远程传输。自供能光通信的未来潜力不仅在于提升系统绿色性与部署灵活性，更可能成为“无源物联网”通信基础设施的重要支柱。

光感知子系统在多个领域展现其独特优势。例如，在自动驾驶汽车中，激光雷达系统通过光感知技术精确地测量车辆周围的环境，提供了关键的空间信息，从而支持车辆的自主导航和决策^[93]。在机器人领域，光触觉和视触觉传感技术使机器人能够更精准地感知和识别周围环境及物体，增强了它们的互动能力和作业效率^[94]。在工业自动化领域，光学传感器被用于监测生产线上的物体和工人的状态，同时实现智能决策、控制和交互等功能，提高生产过程的精度和效率^[95-96]。在智能家居领域，光感知系统可以智能监测家居环境和人，提升生活质量与健康水平，如通过光线调节实现情绪舒缓与睡眠改善，使用光学传感器监测室内环境质量和居住者健康状态，以及进行系统整合以实现集通信、感知、照明与健康管理等于一体的应用^[97-99]。在医疗成像领域，光学成像技术如光学相干断层扫描为医生提

供了非侵入式的诊断工具，能够生成高分辨率的组织和器官图像^[100]。

光计算子系统的一个典型应用是在数据中心的高性能计算^[101]。利用光计算技术，如光子集成电路和光处理器，数据中心能够以更高的速度处理大量数据，同时显著降低能耗。在量子计算领域，光子技术被用来实现量子比特，开辟了新的计算范式^[102]。此外，光计算也被应用于人工智能领域，如利用光子神经网络加速机器学习算法的训练和推理过程^[103]。

光显示子系统在消费电子产品中得到了广泛应用^[61]。例如，智能手机和电视中普遍采用的OLED显示屏，以其卓越的色彩表现和高对比度改善了用户的视觉体验^[104]。在专业领域，如医学成像和工程设计，高分辨率的显示系统提供了更精确和详细的图像信息^[105]。此外，光显示技术在AR和VR设备中扮演着关键角色，为用户提供了沉浸式的交互体验，这些技术的发展正推动着新型娱乐、教育和设计应用的创新^[106]。

光健康子系统已在消费电子和临床医疗两大领域实现重要应用。在消费电子领域，基于PPG原理的可穿戴设备（如智能手表）已实现心率、血氧饱和度等生理参数的日常监测功能。目前，部分研究者也正在开发更加贴合人体皮肤的柔性PPG传感系统，用以获取更加准确的监测结果^[107]。在临床上，特定波长的红光和蓝光LED已被用于痤疮等皮肤疾病的治疗，而低强度激光疗法则在神经退行性疾病的神经调控方面显示出潜在疗效^[108-109]。此外，光健康技术还延伸至昼夜节律调节领域，智能光照系统通过精准调控光照参数可对用户的睡眠进行干预，这种非药物干预方式对内分泌调节及某些精神疾病的辅助治疗具有积极意义^[110]。

从系统结构视角来看，各子系统在功能层级上形成“感知-传输-处理-输出”的链式结构，分别对应信息处理周期的采集、通信、计算与交

互4个阶段^[111]。它们之间通过标准化光电接口实现模块级互联，而整体架构边界则在物理输入（传感）与用户输出（显示/交互）之间形成闭环^[112]。在物理实现层面，感知模块与通信模块通常通过集成式探测阵列与模数转换链路耦合，通信与计算模块以硅光互联或可编程光路进行高速数据转接，而显示模块则以图像流或视觉反馈为统一输出通道。功能逻辑上，各模块边界清晰、协同明确：感知负责环境信息获取，通信支持数据传输互联，计算承担智能处理与决策，显示则完成人机界面输出。这种“物理隔离+协议互联”的系统划分方式，不仅保障了模块的独立优化与解耦升级，也为跨系统性能调度和灵活集成提供了可扩展基础。此外，部分子系统之间还存在功能交叠区域，例如，感知与通信的协同对准机制、计算与显示的视觉优化链路等，正逐步推动系统从松散堆叠向软硬一体、结构融合的方向演进。

3.3 子系统集成与应用

光载信息子系统的集成与应用是实现高效、灵活和可靠系统架构的关键。整合光通信、光感知、光计算和光显示等不同子系统，可构建具有复杂功能和高性能的综合光电系统^[113-114]。这些子系统之间相互赋能，通过协同运行提升各自性能，进而增强整体系统能力。集成不仅体现在技术和器件的融合层面，更体现在功能耦合与应用适配方面。这一体系结构使光电技术能够广泛应用于多个领域，在更高数据传输速率、更精准测量、更丰富交互体验等方面展现显著优势。

在无线光通信系统中，发射端和接收端光信号的对准非常影响通信效率^[115-116]。这种对准过程本质上是光通信子系统的光感知功能，通过感知技术精确测量并调整光路径，确保信号传输的准确高效。当环境变化或系统误差使得单个感知系统难以达到理想的对准效果时，可以利用分布式光感知系统来进行联合感知，通过整合各个感

知点的数据，弥补单一系统的不足，从而优化整体的通信链路对准效果，增强整个通信系统的性能和可靠性。这一策略实质上借鉴了RF技术中的感通算协同方法，将其应用于光通信领域，可实现通过感知增强通信性能的目标。

在未来数据中心中，光通信和光计算子系统的集成可以提升数据处理速度和能效^[117-118]。光通信网络凭借其低时延和高带宽的特性，可以有效支持光计算子系统对大规模信息的即时接收与处理^[54]。光计算子系统的并行处理能力可以快速分析数据，并将处理结果通过光网络高效传回^[53]。这种双向动态协同不仅能提升数据处理速度，还通过光信息技术的低能耗特性优化整体能效，实现数据处理的高速化与绿色化。

在AR和VR技术中，光感知与光显示子系统的紧密集成是实现高质量用户体验的关键之一^[119-120]。光感知子系统通过高精度传感器捕捉现实世界的图像和深度信息，而这些信息被用来实时调整和优化光显示系统中的图像渲染。同时，通过追踪用户的眼动和头部移动，光感知系统可以精准地确定用户的观察焦点，光显示子系统随即调整图像以提供最佳的视觉和交互体验。这种感知与显示之间的协同，增强了用户的沉浸感和体验感。

在此基础上，光载信息系统正逐渐朝着“感通算显康一体化”方向发展，即在统一架构下实现感知、通信、计算、显示与健康应用的有机协同，并根据不同场景需求灵活实现部分或全部功能^[8,121-123]。该理念强调，光不仅是数据的载体，更是环境与人体状态感知的通道、智能计算与通信的媒介、交互信息的显示界面及健康监测和支持的综合平台。系统可通过光感知模块获取外部环境 with 用户状态，光通信模块实现高速数据传输，光计算模块进行本地或边缘智能处理，光显示模块提供实时可视化反馈，光健康模块则基于生物光学技术开展无创监测与干预，如睡眠节律



调节、疲劳识别等。这种一体化发展路径正推动光载信息系统向更高层次的智能化、人本化、协同化演进。从实际场景角度看，光载信息子系统正逐步构建面向行业需求的应用闭环。例如，在智能汽车中，激光雷达实现三维感知，VLC完成车间通信，边缘光计算处理驾驶决策，平视显示器（headup display, HUD）进行实时信息显示，四者共同构成闭环信息系统^[124]；在智能医疗中，多模光感知采集生理信号，VLC同步传输至云端，AI光计算完成诊断判断，微显示屏提供结果反馈，形成“感-传-算-显”的端到端闭环^[125]。这类集成事例日益增多，表明光载信息系统的场景适配能力正在持续增强。

4 光载信息应用

4.1 应用场景

光载信息技术在各个领域的应用不断扩展、提供创新的解决方案和提升效率的途径。从6G通信到智能家居、智能制造、智慧城市，乃至航空航天领域，光载信息技术正日益发挥着越来越重要的作用。

6G通信预计将超越现有的5G等通信技术，提供更快的数据传输速率、更低的时延和更广泛的连接范围^[126]。光载信息技术在6G中的应用包括利用光子技术进行数据传输和接收，这不仅提高了通信的速率和带宽，还降低了能源消耗^[127]。6G通信网络的发展将推动物联网、自动驾驶、远程医疗等领域的革新，为用户带来更丰富、更高效连接体验。

智能家居与智慧照明正成为现代生活的重要组成部分。在这一领域中，光载信息技术通过集成高效的LED照明和智能传感器，实现了对家庭环境的智能控制和能源管理^[80,128-129]。例如，智能照明系统能够根据房间的使用情况自动调节亮度和色温，而智能传感器则能够监测和响应环境变化，如温度、湿度和光线强度，部分系统还实

现了感知信号的多功能复用与低功耗运行^[48,130]。这些技术不仅提高了居住的舒适度，还有助于节能减排。

智能制造是工业4.0的核心，而光载信息技术在此发挥着关键作用^[131]。在生产线上，光学传感器和成像系统被广泛应用于自动化检测和控制交互等方面^[132-133]。光纤通信技术在工厂内部提供了快速且可靠的数据通信，支持机器人和自动化设备的高效运行。光载技术的应用不仅提升了制造效率，还提高了产品质量和生产的灵活性。

智慧城市的建设正深度融入光载信息技术，助力城市在能源管理、交通调度、环境监测、公共安全等多个方面实现智能化升级。凭借高速数据传输与精准环境感知能力，光载信息技术提升了城市运行的效率与响应能力。此外，光纤网络的广泛部署也为大数据、云计算与物联网等数字技术的融合应用提供了坚实的通信支撑^[134]。

智慧交通是光载信息技术的重要应用领域之一，围绕“人-车-路”系统的协同与智能化展开深度融合^[135-137]。其中，车灯作为车载系统的关键组件，逐渐承担起光通信与环境感知的重要任务。例如，基于VLC的车灯可实现车对车与车对基础设施之间的高速数据交换，支持交通信息共享与行驶协同。结合激光雷达与光学传感器，车灯还可实时感知道路和行人状态，为智能驾驶提供环境理解能力。此外，借助光显示技术，车灯可进行图像投射与状态提示，增强人机交互效果。在部分系统中，车灯还融合了生物光感知模块，用于识别驾驶员疲劳状态并智能调节光照环境，从而提升驾驶安全性与舒适度。

航空航天领域，光载信息技术在通信、遥感探测和导航系统中扮演着至关重要的角色^[138-139]。在航天器和卫星上，光载技术用于高速数据传输和远程地球观测，提供了精确的遥感数据和通信服务。此外，光学仪器和传感器在空间探索中用

于测量和分析天体的物理和化学特性，为科学研究提供了宝贵的数据。

4.2 应用的实现路径

光载信息技术在多个领域得到了广泛的应用，而实现这些应用需要综合考虑技术创新、系统集成和应用场景的需求。技术创新是推动光载信息应用实现的首要路径，包括开发新型的光学材料、高性能的光学器件和先进的信号处理技术^[140]。例如，为了提高光通信的速度和可靠性，需要不断优化光源和传感器的性能，同时研发更高效的光信号编码和解码算法^[141]。在光计算领域，研究新型光逻辑门和光子集成电路对于实现高速和低能耗的光计算系统至关重要^[142]。系统集成是实现光载信息应用的另一个关键路径。这涉及将多种光学和电子组件整合在一起，形成高效、紧凑且功能全面的系统^[143]。例如，在智慧城市项目中，集成光通信、光感知和智能照明系统，可以提高城市管理的效率和居民生活的质量^[80]。在这个过程中，确保不同系统之间的兼容性和协同工作是实现集成的主要挑战。最后，成功实现光载信息应用还需要紧密结合具体的应用场景需求。这意味着解决方案必须针对特定行业或用户群体的需求进行定制。例如，在智能制造领域，光载信息技术需要满足工业环境中对精度、速度和可靠性的高要求^[144]；而在医疗应用中，则需要重点关注光学设备的安全性和对生物组织的兼容性^[145]。

光载信息技术的应用推进也愈发依赖于标准体系的成熟与系统间的互操作能力。以通信子系统为例，可见光通信已被纳入《IEEE局域网和城域网标准》(IEEE 802.15.7-2018)等国际标准框架^[146]，同时被视为6G通信的备选技术，其在室内照明-通信融合、车载车联网等场景中正在从实验验证走向规模部署^[147]，有效支撑光载信息中光与RF的深度融合；空间激光通信则由国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)牵头推进星

地链路通信协议、调制格式与数据同步机制的标准化，以支持星座组网和天地一体化网络的高速接入^[148]。在计算方面，硅光子AI芯片和光子互联平台的标准进程仍处于早期，封装接口、光电转换协议及可编程控制接口尚未统一，影响了其在异构系统中的互操作效率^[147]。即使在相对成熟的光传感与光显示领域，不同厂商在波段覆盖、调制方法、信号处理与控制接口等层面仍缺乏统一协议，增加了多设备集成和系统维护的工程复杂性。标准化的滞后不仅限制了系统模块间的自由组合，也在一定程度上制约了光载信息系统的规模化部署与性能优化。例如，相较于RF通信，空间激光链路在已验证系统中可实现1 Tbit/s以上速率，时延低至 μs 级^[4]；而基于光计算的神经网络芯片能耗常低于1 pJ/bit，推理时延可达ns量级，远优于传统电子方案^[5]。由于缺乏统一封装、调度和接口协议，这些先进能力在复杂系统中的部署效率仍然有限。因此，从这个维度来看，深圳市对在包括“光载信息”的未来产业培育中明确提出“一套标准体系”的要求，也提供了系统性解决上述问题的思路，推动跨子系统的标准协同、接口对接与协议融合，将成为光载信息从单点突破走向系统联动的必要支撑，也应成为未来应用实现路径中的重要组成部分。

5 结束语

光载信息技术在通信、感知、计算和显示等多个领域取得了显著突破，其发展路线如图4所示。光载信息技术以其高速率、低功耗和大带宽的优势，为信息技术的发展开辟了新的方向，正逐渐成为现代社会不可或缺的一部分。从6G通信到智慧城市，从智能制造到航空航天，光载信息技术的应用边界持续拓展，展现出广阔的前景与应用价值。

尽管光载信息技术正快速发展，但在推广与实际部署过程中仍面临诸多挑战。其中，技术实

现的复杂性、高成本和标准化问题是当前发展的主要障碍。面向未来,光载信息技术的发展将更多聚焦于性能提升、成本控制与应用拓展。一方面,高效的光子器件、更具鲁棒性的光计算模型,以及大规模光网络的部署将成为推动该领域持续突破的核心动力。另一方面,随着物联网和人工智能的加速融合,光载信息将在智能设备与系统中衍生出更多的应用。从光对节律调节的作用来看,光还能承载相关生物信息,参与相关生化反应并打开相应的离子通道,因此,对光健康领域的深入研究对于揭示生命现象,乃至认知科学的进步都将起到极其重要的作用。此外,跨学科融合与产业协同将为光载信息技术注入更多创新活力。

总体而言,光载信息技术正处于快速发展的阶段。它不仅为现代社会的技术发展提供了新的动力,也为未来的创新和变革铺平了道路。随着研究的深入和技术的成熟,光载信息技术有望在更广泛领域中实现革命性突破,为人类社会进步贡献力量。

致谢:衷心感谢常瑞华院士、黄翊东院士、甯存政教授等专家的宝贵建议!

参考文献:

- [1] CASTELLS M. The rise of the network society[M]. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [2] GAGLIARDI R M, KARP S. Optical communications: second edition[M]. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- [3] OH S, YU M, CHO S, et al. Bi-LSTM-augmented deep neural network for multi-gbps VCSEL-based visible light communication link[J]. *Sensors*, 2022, 22(11): 4145.
- [4] PANDI V S, SINGH M, MALHOTRA J, et al. A spectral-efficient 1 Tbps terrestrial free-space optics link based on super-channel transmission[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(5): 252.
- [5] ZHENG X Z, LUO Y, LEXAU J, et al. 2-pJ/bit (on-chip) 10-Gb/s digital CMOS silicon photonic link[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(14): 1260-1262.
- [6] OPHIR N, MINEO C, MOUNTAIN D, et al. Silicon photonic microring links for high-bandwidth-density, low-power chip I/O[J]. *IEEE Micro*, 2013, 33(1): 54-67.
- [7] SALEH B E A, TEICH M C. Fundamentals of photonics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [8] SONG J, WANG X F, WANG J T, et al. The converged Internet of lights network for telecommunication, positioning, illumination, and medical therapy[J]. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2020, 4(3): 70-75.
- [9] SZE S M, NG K K. Physics of semiconductor devices[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [10] AGRAWAL G P. Fiber-optic communication systems[M]. New York: John Wiley & Sons, 2021.
- [11] KRAUSS T. Photonic crystals in the optical regime: past, present and future[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 1999, 23(2): 51-96.
- [12] KIM J, SONG S, KIM Y-H, et al. Recent progress of quantum dot-based photonic devices and systems: a comprehensive review of materials, devices, and applications[J]. *Small Structures*, 2021, 2(3): 2000024.
- [13] LIU X. Enabling optical network technologies for 5G and beyond[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(2): 358-367.
- [14] LIU X. Optical communications in the 5G era[M]. Amsterdam: Elsevier, 2022.
- [15] KEISER G. Optical fiber communications[M]. Singapore: Springer, 2021.
- [16] ALEXOUDI T, TERZENIDIS N, PITRIS S, et al. Optics in computing: from photonic network-on-chip to chip-to-chip interconnects and disintegrated architectures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 363-379.
- [17] LEVI A F J. Challenges for photonics in future systems[C]// Proceedings of the Digest of the LEOS Summer Topical Meetings Biophotonics/Optical Interconnects and VLSI Photonics/WBM Microcavities, 2004. Piscataway: IEEE Press, 2004: 1-2.
- [18] O'BRIEN P. Scaling of integrated photonic packaging for volume manufacture[C]// Proceedings of the 2018 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-2.
- [19] TAUKE-PEDRETTI A. The path for scaling photonic integrated circuits[C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024. 2024: Tu2F.5.
- [20] SUI X, WU Q, LIU J, et al. A review of optical neural networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 70773-70783.



- [21] ZUFFADA M. The industrialization of the silicon photonics: technology road map and applications[C]//2012 Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 7-13.
- [22] KASAP S, CAPPER P. Springer handbook of electronic and photonic materials[M]. Cham: Springer, 2017.
- [23] SCHRODER D K. Semiconductor material and device characterization[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [24] HADDARA Y M, ASHBURN P, BAGNALL D M. Silicon-germanium: properties, growth and applications[M]. Cham: Springer, 2017.
- [25] JACKSON K A. Compound semiconductor devices: Structures and processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [26] NAGARAJAN R, KATO M, PLEUMEEKERS J, et al. InP photonic integrated circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5): 1113-1125.
- [27] YODER M N. Wide bandgap semiconductor materials and devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43(10): 1633-1636.
- [28] PEARTON S J, ZOLPER J C, SHUL R J, et al. GaN: processing, defects, and devices[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 86(1): 1-78.
- [29] SADDOW S E, AGARWAL A K. Advances in silicon carbide processing and applications[M]. Boston: Artech House, 2004.
- [30] CHEN C H, HARGIS M, WOODALL J M, et al. GHz bandwidth GaAs light-emitting diodes[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(21): 3140-3142.
- [31] HINAKURA Y, ARAI H, BABA T. 64 Gbps Si photonic crystal slow light modulator by electro-optic phase matching[C]//Proceedings of the 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [32] BARNES C E. Radiation effects in 1.06- μm InGaAs LED's and Si photodiodes[J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(8): 5242-5250.
- [33] YOSHIMOTO M, HUANG W, FENG G, et al. Molecular-beam epitaxy of GaNAsBi layer for temperature-insensitive wavelength emission[J]. Journal of Crystal Growth, 2007, 301/302: 975-978.
- [34] WU C X, YAN B S, ZHANG C R, et al. P-GaN/n-ZnO nanoplate/CsPbBr₃ quantum dots heterojunction light-emitting diode for dual-wavelength emission[J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(1): 493-498.
- [35] LI J, HU C K, LIAO S N, et al. Investigation of CsSn_{0.2}Pb_{0.8}I₃ QDs applied to carbon-based self-powered perovskite photodetectors[J]. Applied Physics A, 2024, 130(8): 602.
- [36] VARSHNEY U, SHARMA A, GUPTA G. Ultra-low NEP and fast response self-powered broadband photodetector based on β -Ga₂O₃ film grown on Si and GaN substrates[J]. Applied Surface Science, 2025, 688: 162368.
- [37] YANG Y J, PAN Z D, LIU X T, et al. Ultrasensitive photodetection and metal-semiconductor transition in Bi₂S₃ phototransistor[J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(5): 2402501.
- [38] ZHOU X X. An InGaAlAs-InGaAs two-colour detector, InAs photodiode and Si SPAD for radiation thermometry[D]. Sheffield: The University of Sheffield, 2014.
- [39] OZDEMIR C I, DE KONINCK Y, YUDISTIRA D, et al. Low dark current and high responsivity 1020nm InGaAs/GaAs nanoridge waveguide photodetector monolithically integrated on a 300-mm Si wafer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(16): 5263-5269.
- [40] YUAN Z X, LI Y Z, LU X Y, et al. Investigation of modulation bandwidth of InGaN green micro-LEDs by varying quantum barrier thickness[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(8): 4298-4305.
- [41] NAKAMURA S. The roles of structural imperfections in InGaN-based blue light-emitting diodes and laser diodes[J]. Science, 1998, 281(5379): 955-961.
- [42] JAGADISH C, GUNAPALA S, RHIGER D. Advances in infrared photodetectors[M]. California: Academic Press, 2011.
- [43] GEFFROY B, LE ROY P, PRAT C. Organic light-emitting diode (OLED) technology: materials, devices and display technologies[J]. Polymer International, 2006, 55(6): 572-582.
- [44] SHU Y F, LIN X, QIN H Y, et al. Quantum dots for display applications[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2020, 59(50): 22312-22323.
- [45] CHROSTOWSKI L, HOCHBERG M. Silicon Photonics Design[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [46] JAUREGUI C, LIMPET J, TUNNERMANN A. High-power fibre lasers[J]. Nature Photonics, 2013, 7(11): 861-867.
- [47] ANDERSON L K, MCMURTRY B J. High-speed photodetectors[J]. Applied Optics, 1966, 5(10): 1573-1587.
- [48] LIANG C X, LI J R, LIU S C, et al. Integrated sensing, lighting and communication based on visible light communication: a review[J]. Digital Signal Processing, 2024, 145: 104340.
- [49] YANG F, GAO J N, LIU S C. Novel visible light communication approach based on hybrid OOK and ACO-OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14): 1585-1588.

- [50] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [51] STEGEMAN G I, STEGEMAN R A. *Nonlinear optics: phenomena, materials and devices*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [52] TAIT A N, DE LIMA T F, ZHOU E, et al. Neuromorphic photonic networks using silicon photonic weight banks[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7430.
- [53] HECK M J R, BAUTERS J F, DAVENPORT M L, et al. Hybrid silicon photonic integrated circuit technology[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 6100117.
- [54] MILLER D A B. Device requirements for optical interconnects to silicon chips[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(7): 1166-1185.
- [55] SONG J, DING W B, YANG F, et al. An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2015, 61(2): 299-308.
- [56] CHAI C C, ZHANG X-P. Unified probability distributions of composite fading for radio frequency and optical wireless channels[C]//*Proceedings of the GLOBECOM 2023-2023 IEEE Global Communications Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [57] GENG Z H, TANG X K, ZHANG X-P, et al. Layered hybrid PAM-DMT for IM/DD OWC systems[J]. *Optics Express*, 2023, 31(20): 32383-32392.
- [58] SANTOS J L, FARAHI F. *Handbook of Optical Sensors*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [59] LI X J, SHAO Z Z, ZHU M J, et al. *Fundamentals of optical computing technology*[M]. Singapore: Springer, 2018.
- [60] COLDREN L A, CORZINE S W, MAŠANOVIĆ M L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [61] KARIM M A. *Electro-optical displays*[M]. Boca Raton: CRC Press, 1992.
- [62] KHARCHE S, KHARCHE J. 6G intelligent healthcare framework: a review on role of technologies, challenges and future directions[J]. *Journal of Mobile Multimedia*, 2023, 19(3): 603-644.
- [63] HERNÁNDEZ-BULE M L, NAHARRO-RODRÍGUEZ J, BACCI S, et al. Unlocking the power of light on the skin: a comprehensive review on photobiomodulation[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(8): 4483.
- [64] CHI Y-C, HSIEH D-H, TSAI C-T, et al. 450-nm GaN laser diode enables high-speed visible light communication with 9-Gbps QAM-OFDM[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 13051-13059.
- [65] BUHAF A M. Investigation and implementation of dicode pulse position modulation over indoor visible light communication system[D]. Huddersfield: University of Huddersfield, 2015.
- [66] RICCI S, CAPUTO S, MUCCHI L. FPGA-based visible light communications instrument for implementation and testing of ultralow latency applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 2004811.
- [67] KOYAMA S, ISHII M, SAITO S, et al. A 220 M-range direct time-of-flight 688×384 CMOS image sensor with sub-photon signal extraction (SPSE) pixels using vertical avalanche photodiodes and 6 kHz light pulse counters[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE Symposium on VLSI Circuits*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 71-72.
- [68] VILLA F, LUSSANA R, BRONZI D, et al. CMOS imager with 1024 SPADs and TDCs for single-photon timing and 3-D time-of-flight[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 3804810.
- [69] JAHANNIA B, YE J C, ALTALEB S, et al. Low-latency full precision optical convolutional neural network accelerator[C]//*Proceedings of the AI and Optical Data Sciences V*. Bellingham: SPIE, 2024: 9.
- [70] PEI L, XI Z Y, BAI B, et al. Joint device architecture algorithm codesign of the photonic neural processing unit[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, 2(3): 036014.
- [71] ZHANG M, YIN D, GANGI N, et al. TeMPO: Efficient time-multiplexed dynamic photonic tensor core for edge AI with compact slow-light electro-optic modulator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 135(22): 223105.
- [72] XU B, HUANG Z F, FANG Y T, et al. Optical spiking neurons enable high-speed and energy-efficient optical neural networks[J]. *arXiv preprint*, 2024, arXiv: 2409.05726.
- [73] GHOSH A, KHAYRULLIN I, WANG Q, et al. OLED microdisplays for VR/AR applications[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(S1): 26-27.
- [74] JO J, JOUNG S R, BAIK S M, et al. High-luminance, large-size 4K OLED microdisplays for VR/MR applications[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2024, 32(5): 371-378.
- [75] MESTROM E, DENEER R, BONOMI A G, et al. Validation of heart rate extracted from wrist-based photoplethysmography in the perioperative setting: prospective observational study[J].



- JMIR Cardio, 2021, 5(2): e27765.
- [76] SPIERER D K, ROSEN Z, LITMAN L L, et al. Validation of photoplethysmography as a method to detect heart rate during rest and exercise[J]. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 2015, 39(5): 264-271.
- [77] LIU S H, LIU H C, CHEN W X, et al. Evaluating quality of photoplethysmographic signal on wearable forehead pulse oximeter with supervised classification approaches[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 185121-185135.
- [78] PUCCI C, DE PASQUALE D, DEGL'INNOCENTI A, et al. Chlorin e6-loaded nanostructured lipid carriers targeted by angioprep-2: advancing photodynamic therapy in glioblastoma[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2025, 14(2): 2402823.
- [79] HEISKANEN V, HAMBLIN M R. Photobiomodulation: lasers vs. light emitting diodes?[J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2018, 17(8): 1003-1017.
- [80] SONG J, WANG J T, YANG F, et al. Internet of light: technologies and applications[J]. *Intelligent and Converged Networks*, 2022, 3(3): 229-243.
- [81] WANG F B, YANG F, SONG J, et al. Access frameworks and application scenarios for hybrid VLC and RF systems: state of the art, challenges, and trends[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(3): 55-61.
- [82] COSMAS J, MEUNIER B, ALI K, et al. 5G Internet of radio light services for supermarkets [C]// *Proceedings of the 2017 14th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 69-73.
- [83] WANG X D, YANG H, SONG J. A VLC-based robust ID broadcasting indoor location system for mobile devices[C]// *Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [84] WANG F B, YANG F, SONG J, et al. Cell zooming for hybrid VLC-RF cellular networks with high energy efficiency[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(5): 789-793.
- [85] WANG F B, YANG F, PAN C Y, et al. Hybrid VLC-RF systems with multi-users for achievable rate and energy efficiency maximization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(9): 6157-6170.
- [86] SONG J, LIU S C, ZHOU G X, et al. A cost-effective approach for ubiquitous broadband access based on hybrid PLC-VLC system[C]// *Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Piscataway: IEEE Press, 2016: 2815-2818.
- [87] LI D J, HU Y, ZHANG G D, et al. An integrated indoor VLC+PLC system for video broadcast and positioning[C]// *Proceedings of the 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [88] YOUNUS O I, RIAZ A, BINNS R, et al. Overview of space-based laser communication missions and payloads: insights from the autonomous laser inter-satellite gigabit network (ALIGN)[J]. *Aerospace*, 2024, 11(11): 907.
- [89] COR-HACER ATAR A. Free space satellite laser communication[C]// *Proceedings of the 2000 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings. Electronic-Enhanced Optics. Optical Sensing in Semiconductor Manufacturing. Electro-Optics in Space. Broadband Optical Networks*. Piscataway: IEEE Press, 2000: III7-III8.
- [90] PANAH A S, KAZEMI A A. Inter-satellite communications using laser based optical links[C]// *Proceedings of the Photonics in the Transportation Industry: Auto to Aerospace*. Bellingham: SPIE, 2007: 67580G.
- [91] MARTIN-PIMENTEL P, ROCHOW C, TROENDLE D C, et al. Laser Com in space, the operational concept[C]// *Proceedings of the SpaceOps 2014 Conference*. Reston, Virginia: AIAA, 2014: 1839.
- [92] DING W B, WU C S, ZI Y L, et al. Self-powered wireless optical transmission of mechanical agitation signals[J]. *Nano Energy*, 2018, 47: 566-572.
- [93] RORIZ R, CABRAL J, GOMES T. Automotive LiDAR technology: a survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(7): 6282-6297.
- [94] LI S J, YU H X, PAN G P, et al. M³Tac: a multispectral multimodal visuotactile sensor with beyond-human sensory capabilities[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2024, 40: 4484-4503.
- [95] LI J R, LIANG C X, XIE Z X, et al. Poster: real-time material and texture recognition using visible light communication [C]// *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Service*. New York: ACM Press, 2024:696-697.
- [96] LIANG X J, LI J R, XU C H, et al. Gesture recognition and control based on visible light communication[C]// *Proceedings of the 2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 6164-6169.
- [97] LI J R, GE C S, XU C H, et al. VLocSense: integrated VLC system for indoor passive localization and human sensing[C]//

- Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2024: 2022-2027.
- [98] LI J R, XIE Z X, LIANG C X, et al. Indoor health monitoring with VLC-based passive posture monitoring[C]//Proceedings of the 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-8.
- [99] XU Z C, LIANG C X, WANG J Y, et al. LiFall: passive indoor fall detection system based on illumination and visible light communication networks[C]//Proceedings of the 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-8.
- [100] ARAKI M, PARK S-J, DAUERMAN H L, et al. Optical coherence tomography in coronary atherosclerosis assessment and intervention[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2022, 19(10): 684-703.
- [101] AMBS P. Optical computing: a 60-year adventure[J]. *Advances in Optical Technologies*, 2010, 2010(1): 372652.
- [102] WANG J W, SCIARRINO F, LAING A, et al. Integrated photonic quantum technologies[J]. *Nature Photonics*, 2019, 14(5): 273-284.
- [103] HUANG C R, FUJISAWA S, DE LIMA T F, et al. A silicon photonic - electronic neural network for fibre nonlinearity compensation[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(11): 837-844.
- [104] KUNIĆ S, ŠEGO Z. OLED technology and displays[C]// Proceedings of ELMAR-2012. Piscataway: IEEE Press, 2012: 31-35.
- [105] LI Y-L, LI N-N, WANG D, et al. Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 188.
- [106] XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 216.
- [107] LEE G H, KANG H, CHUNG J W, et al. Stretchable PPG sensor with light polarization for physical activity-permissible monitoring[J]. *Science Advances*, 2022, 8(15): eabm3622.
- [108] ABIJO A, LEE C Y, HUANG C Y, et al. The beneficial role of photobiomodulation in neurodegenerative diseases[J]. *Biomedicine*, 2023, 11(7): 1828.
- [109] AUSTIN E, GEISLER A N, NGUYEN J, et al. Visible light. Part I: Properties and cutaneous effects of visible light[J]. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2021, 84(5): 1219-1231.
- [110] BAUER M, GLENN T, MONTEITH S, et al. The potential influence of LED lighting on mental illness[J]. *The World Journal of Biological Psychiatry*, 2018, 19(1): 59-73.
- [111] KANNO A. Radio and optical integration toward society 5.0 and 6G[C]//Proceedings of the 2020 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [112] HE H J, JIANG L, PAN Y, et al. Integrated sensing and communication in an optical fibre[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 25.
- [113] WEN Y F, YANG F, SONG J, et al. Free space optical integrated sensing and communication based on LFM and CPM[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(1): 43-47.
- [114] WEN Y F, YANG F, SONG J, et al. Optical integrated sensing and communication: architectures, potentials and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2024, 7(4): 68-74.
- [115] LI J M, CHAI S Z, ZHENG D, et al. An automatic alignment bidirectional visible light communication system based on red laser diode[C]//Proceedings of the 2021 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [116] WEN Y F, YANG F, SONG J, et al. Pulse sequence sensing and pulse position modulation for optical integrated sensing and communication[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(6): 1525-1529.
- [117] CHENG Q X, BAHADORI M, GLICK M, et al. Recent advances in optical technologies for data centers: a review[J]. *Optica*, 2018, 5(11): 1354.
- [118] KACHRIS C, TOMKOS I. A survey on optical interconnects for data centers[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 14(4): 1021-1036.
- [119] LIU Z Y, WANG D Y, GAO H, et al. Metasurface-enabled augmented reality display: a review[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5: 034001.
- [120] SHVETSOV A V, HAMOOD ALSAMHI S. When holographic communication meets metaverse: applications, challenges, and future trends[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 197488-197515.
- [121] WANG T J, YANG F, SONG J, et al. Dimming techniques of visible light communications for human-centric illumination networks: state-of-the-art, challenges, and trends[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(4): 88-95.
- [122] SONG J, WANG X F, ZHANG H M, et al. Exploration of non-intrusive optical intervention therapy based on the indoor smart lighting facility[C]//Proceedings of the 2019 ITU Kaleidoscope: ICT for Health: Networks, Standards and Innovation



- (ITU K). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [123] WANG F B, YANG F, PAN C Y, et al. Joint illumination and communication optimization in indoor VLC for IoT applications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(21): 20788-20800.
- [124] POULTON C V. Integrated LIDAR with optical phased arrays in silicon photonics[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2016.
- [125] CHEN J, WANG Z, XIAO K, et al. AI-enabled scalable smart-phone photonic sensing system for remote healthcare monitoring[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(4): 4510-4524.
- [126] CHOWDHURY M Z, SHAHJALAL M, AHMED S, et al. 6G wireless communication systems: applications, requirements, technologies, challenges, and research directions[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 957-975.
- [127] CHOWDHURY M Z, SHAHJALAL M, HASAN M K, et al. The role of optical wireless communication technologies in 5G/6G and IoT solutions: prospects, directions, and challenges[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4367.
- [128] SIKDER A K, ACAR A, AKSU H, et al. IoT-enabled smart lighting systems for smart cities[C]//*Proceedings of the 2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 639-645.
- [129] LI J R, GE C S, TAO J, et al. SolareSkin: self-powered visible light sensing through a solar cell E-Skin[C]//*Proceedings of the 2023 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing & the 2023 ACM International Symposium on Wearable Computing*. New York: ACM Press, 2023: 644-649.
- [130] WANG Z H, LI J R, JIN Y C, et al. Sensing beyond itself: multi-functional use of ubiquitous signals towards wearable applications[J]. *Digital Signal Processing*, 2021, 116: 103091.
- [131] SANTOS J L. Optical sensors for industry 4.0[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(6): 5600911.
- [132] LI J R, XU Q H, XU Z C, et al. PowerGest: self-powered gesture recognition for command input and robotic manipulation[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE 30th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 528-535.
- [133] LI J R, XU Q H, ZHU Q Y, et al. Demo: SolarSense: a self-powered ubiquitous gesture recognition system for industrial human-computer interaction[C]//*Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*. New York: ACM Press, 2024: 600-601.
- [134] BOURMPOS M, ARGYRIS A, SYVRIDIS D. Smart city surveillance through low-cost fiber sensors in metropolitan optical networks[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2014, 33(3): 205-223.
- [135] AN N, YANG F, CHENG L, et al. Free space optical communications for intelligent transportation systems: potentials and challenges[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2023, 18(3): 80-90.
- [136] SEFAKO T, YANG F, SONG J, et al. A review of machine learning techniques for optical wireless communication in intelligent transport systems[J]. *Intelligent and Converged Networks*, 2024, 5(4): 284-316.
- [137] HUANG X, YANG F, SONG J, et al. An optical communication approach for ultra-high-speed train running in evacuated tube: potentials and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(3): 70-76.
- [138] DJORDJEVIC I B. Deep-space and near-Earth optical communications by coded orbital angular momentum (OAM) modulation[J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14277-14289.
- [139] ISRAEL D J, EDWARDS B L, BUTLER R L, et al. Early results from NASA's laser communications relay demonstration (LCRD) experiment program[C]//*Proceedings of the Free-Space Laser Communications XXXV*. Bellingham: SPIE, 2023, 1241303.
- [140] SOREF R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1678-1687.
- [141] MILLER D A B. Attojoule optoelectronics for low-energy information processing and communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 346-396.
- [142] 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.
- [143] KAUR P, BOES A, REN G H, et al. Hybrid and heterogeneous photonic integration[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(6): 061102.
- [144] DANYS L, ZOLOTOVA I, ROMERO D, et al. Visible light communication and localization: a study on tracking solutions for industry 4.0 and the operator 4.0[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 64: 535-545.

[145] CHEONG Y K, NG X W, CHUNG W Y. Hazardless biomedical sensing data transmission using VLC[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(9): 3347-3348.

[146] UYSAL M, MIRAMIRKHANI F, NARMANLIOGLU O, et al. IEEE 802.15.7r1 reference channel models for visible light communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(1): 212-217.

[147] CAHYADI W A, CHUNG Y H, GHASSEMLOOY Z, et al. Optical camera communications: principles, modulations, potential and challenges[J]. Electronics, 2020, 9(9): 1339.

[148] EDWARDS B L. Latest status of the CCSDS optical communications working group[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.

[作者简介]



李嘉荣 (1997-), 男, 清华大学深圳国际研究生院博士生, 主要研究方向为可见光通信感知一体系统、泛在光感知与交互等。



丁文伯 (1990-), 男, 博士, 清华大学深圳国际研究生院副教授, 主要研究方向为可见光通信、机器人信号处理、具身智能、人机界面、多智能体强化学习等。



杨昉 (1983-), 男, 博士, 清华大学电子工程系副教授, 主要研究方向为可见光通信、电力线通信、数字电视地面广播等。



董宇涵 (1979-), 男, 博士, 清华大学深圳国际研究生院副教授、鹏城实验室副研究员, 主要研究方向为无线通信与网络、无线光通信、机器学习与优化等。



宋健 (1966-), 男, 博士, 清华大学电子工程系、清华大学深圳国际研究生院教授, 宽带多媒体传输技术实验室主任、数字电视系统国家工程实验室(北京)主任, 美国电气电子工程师学会会士, 英国工程技术学会会士, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士, 主要研究方向为数字电视地面广播、无线通信、电力线通信、可见光通信等。



张晓平 (1972-), 男, 博士, 清华大学鹏瑞教授, 加拿大工程院院士, 加拿大工程研究院院士, 美国电气电子工程师学会会士, 主要研究方向为可见光通信和光计算、数据科学、多媒体信号处理、统计模型、机器学习、物联网和电子信息系统、智慧城市、金融经济大数据和金融科技等。