

引用格式: 刘永, 张尚剑, 张旨遥, 等. 从微波光子到光电融合 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(5): 707-728.

Liu Yong, Zhang Shangjian, Zhang Zhiyao, et al. From microwave photonics to optoelectronic fusion[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(5): 707-728. (in Chinese)



从微波光子到光电融合

刘 永^{1*}, 张尚剑¹, 张旨遥¹, 刘富才¹, 魏静轩¹, 祝宁华²

(1. 电子科技大学光电科学与工程学院, 成都 611731; 2. 南开大学智能光子研究院, 天津 300350)

摘要: 微波电子学在处理高频宽带信号时, 长期受限于电子器件的带宽、传输损耗与电磁干扰, 而将信号调制到光载波上进行产生、传输与处理, 可有效规避这些限制, 这正是微波光子学的核心思路。近年来, 随着集成度需求提升, 这一“光电融合”的思路正从系统链路层向芯片器件与材料层延伸。该文以电子科技大学光电科学与工程学院相关团队的工作为例, 围绕这一脉络梳理 3 个层面的关键技术: 在系统层, 介绍光电振荡器、光频梳与光子模数转换如何实现低相噪信号产生与宽带信号采样; 在支撑层, 讨论高速光电子芯片面临的测试难题, 包括晶圆级非侵入探测与频响解耦, 这是器件走向工程应用的前提; 在材料层, 介绍二维滑移铁电材料在存算一体器件中的应用, 以及多维光场探测器对偏振等信息的获取。3 个层面共同反映出光电融合由链路走向器件、由分立走向集成的技术走向, 也提示材料与器件层的本征融合将是后续突破的关键方向。

关键词: 微波光子学; 光电融合; 滑移铁电; 多维光场

中图分类号: TN256

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2026144

From microwave photonics to optoelectronic fusion

LIU Yong^{1*}, ZHANG Shangjian¹, ZHANG Zhiyao¹, LIU Fucui¹, WEI Jingxuan¹, and ZHU Ninghua²

(1. School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Institute of Intelligent Photonics, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In the processing of high-frequency broadband signals, microwave electronics has long been constrained by the bandwidth, transmission loss, and electromagnetic interference of electronic devices. Modulating signals onto optical carriers for generation, transmission, and processing can effectively circumvent these limitations, which constitutes the core paradigm of microwave photonics. In recent years, driven by the increasing demand for integration, this concept of “optoelectronic fusion” has been extending from the system-link level down to the chip, device, and material levels. Taking the research work of related teams from the School of Optoelectronic Science and Engineering at the University of Electronic Science and Technology of China (UESTC) as examples, this paper reviews the key technologies across three levels along this trajectory: At the system level, it introduces how optoelectronic oscillators (OEOs), optical frequency combs (OFCs), and photonic analog-to-digital converters (photonic ADCs) achieve low-phase-noise signal generation and broadband signal sampling. At the supporting level, it discusses the characterization and testing challenges faced by high-speed optoelectronic chips, including wafer-level non-invasive probing and frequency response decoupling, which are essential prerequisites for transitioning devices toward engineering applications. At the material level, it highlights the applications of two-dimensional (2D) sliding ferroelectric materials in in-memory computing devices, as well as multi-dimensional optical field photodetectors for capturing multi-parameter information such as polarization. Collectively, these three levels reflect the technological evolution of optoelectronic fusion from links to devices and from discrete components to integrated systems, while indicating that intrinsic fusion at the material and device levels will be a critical direction for future breakthroughs.

Key words: microwave photonics; optoelectronic fusion; sliding ferroelectricity; multi-dimensional optical field

后摩尔时代, 人工智能、6G 通信与新型算力网络对信息系统的带宽、时延与集成度提出了前所

未有的要求^[1-3], 而传统微波电子学在处理高频宽带信号时, 长期受制于电子器件的带宽极限、传输损

收稿日期: 2026-08-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61927821, 62375042); 四川省科技计划 (2025ZYD0182)

作者简介: 刘永, 博士, 教授, 主要从事光电子技术方面的研究。

*通信作者 E-mail: yongliu@uestc.edu.cn

耗与电磁干扰,已难以独立支撑这一需求^[4]。将光子学的宽带、低损耗特性引入微波系统,实现光、电功能的深度协同,即“微波光子—光电融合”,正逐步成为突破上述瓶颈的重要技术路径^[5-6],其融合的重心也从系统链路层向芯片、器件乃至材料层逐级下沉^[7]。电子科技大学光电科学与工程学院根植于建校之初服务国防电子、雷达与微波技术的学科积淀,在建校 70 年的发展中持续深耕这一方向;本文即以该学院相关团队的代表性工作为例,系统梳理光电融合从系统级应用到材料级本征协同的演进脉络。

1 光电融合层次演进

微波光子学的兴起,可以视为这一融合在系统与链路层面的第一次成功实践。它通过光载微波信号的产生、传输、处理与探测,将光子学的带宽与损耗优势引入传统微波链路,实现了光、电功能在

系统层面的协同,为雷达、通信等系统性能的跃升开辟了新路径^[8-9]。

然而,随着集成度需求的持续提升,仅停留于系统层面的融合,已难以满足下一代信息系统对小体积、低功耗、高集成度的要求。融合的重心必须进一步下沉,从系统链路层深入到芯片、器件乃至材料层面——即在新型材料与器件结构中实现光、电功能的本征协同,涵盖探测、调制、存算一体与多维信息处理等新兴功能,而非仅依赖分立器件的系统级堆叠^[10-12]。

基于这一脉络,本文按照“系统应用—核心支撑—未来演进”3个递进层面展开:第2章聚焦微波光子信号在系统层面的产生、传输与处理;第3章介绍支撑其工程化落地的高速光电子芯片表征测试技术;第4章展望面向后摩尔时代的新型光电融合材料与器件。3个层面对应融合程度由系统向材料逐级深化的演进过程,其内在逻辑如图1所示。

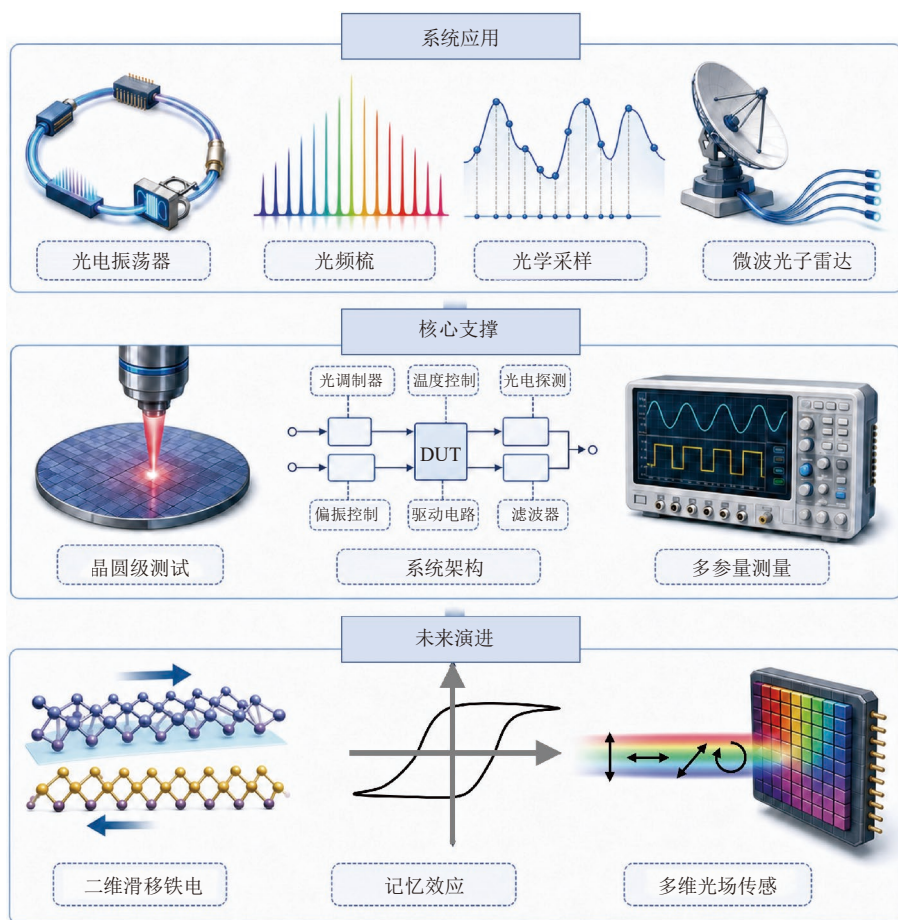


图1 光电融合层次演进示意图

2 系统应用层:微波光子信号的产生、传输与处理

微波光子学在系统应用层的核心价值可概括为

“以光破电”——即利用光学带宽突破电子速率极限、借助光纤传输克服电缆长距离损耗、依靠光子无串扰特性消除电磁干扰,从而为雷达、通信与电

子对抗等射频系统开辟出宽带化、轻量化与高可靠性的变革性发展路径^[5,13]。基于这一理念,电子科技大学微波光子研究中心从信号全生命周期出发,系统布局了三大研究方向:在产生端,聚焦高频宽带信号的光学生成技术;在传输端,攻克光载射频长距离高保真传输的工程化难题;在处理端,致力于宽带微波信号的模拟/数字域处理架构实现。以下将从上述3个方面,依次介绍本研究中心的研究进展与代表性成果。

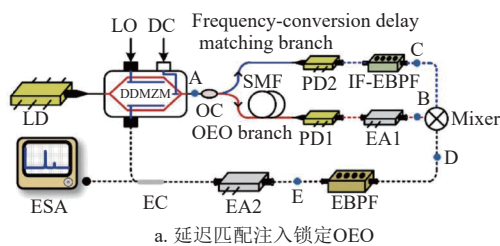
2.1 微波光子信号产生

微波光子信号产生技术旨在突破传统电子振荡器在频率上限与相位噪声方面的物理瓶颈,核心手段包括光外差拍频、光学频率梳以及光电振荡器(optoelectronic oscillator, OEO)等^[14-15]。其中,OEO通过将电信号调制于光载波,经长光纤低延时后反馈至光电探测器,形成正反馈振荡,具备以下独特优势:1) 超低相位噪声——长光纤储能可显著抑制频率抖动;2) 根据所采用的器件及系统架构,OEO工作频率可覆盖兆赫兹至百吉赫兹量级,并可在一定范围内实现连续调谐;3) 结构灵活——能够产生具有复杂波形的宽带微波信号。基于上述优势,OEO不仅适用于单音本振信号,还可灵活生成宽带扫频、跳频、相位编码、超宽带脉冲及噪声等复杂微波信号,为雷达探测、通信组网和电子对抗等系统提供了高性能、多模式的信号源支撑。

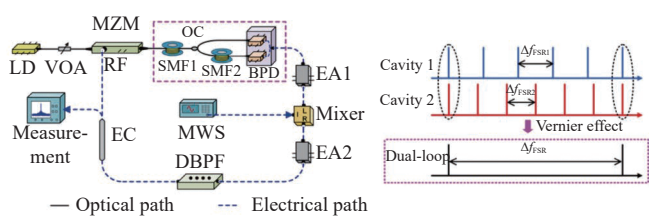
近年来,研究中心围绕基于OEO的高性能微波信号产生开展了深入研究。在理论研究方面,提出了一种OEO时域卷积模型,该模型支持各种OEO的时域、频域、相位噪声特性仿真分析,为

研究OEO的动态过程和输出特性提供了一种通用的理论模型^[16-17]。在单音微波信号产生方面,提出了一种延迟匹配外部注入锁定OEO方案,在有效抑制边模杂散的同时消除了外部注入信号对相位噪声的劣化(图2a)^[18];此外,还将基于电控受激布里渊的微波光子滤波器引入OEO中,实现了频率精细可调谐的单音微波信号产生^[19],目前研究中心所获得的10 GHz信号,其相位噪声已低至 -150 dBc/Hz@10 kHz和 -120 dBc/Hz@1 kHz以下。在多音微波信号产生方面,提出了一种互注入锁定OEO方法,打破了OEO环腔中多音信号之间的增益竞争,实现了宽带可调谐相参双音微波信号的产生(图2b)^[20-21]。

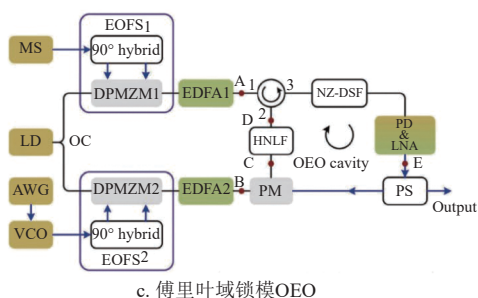
此外,研究中心在基于OEO动态调控产生宽带微波信号方面开展了创新性研究工作。提出了基于电控受激布里渊的傅里叶域锁模光电振荡器,实现了扫频范围可精确定义的高线性度宽带调频信号、互补调频信号和Costas编码调频信号产生^[22-23],并率先揭示了傅里叶域锁模光电振荡器的锁模机制(图2c)^[24]。此外,在国际上率先将时域锁模机制引入OEO,通过主动锁模OEO实现了具有超低近端相位噪声的微波脉冲信号产生(图2d)^[25],并通过注入锁定效应提取出具有超低近端相位噪声的微波本振信号^[26],为强杂波环境下的“低慢小”目标高灵敏雷达探测提供了优质的信号源。为了满足脉冲多普勒雷达探测可重构信号产生的需求,还对主动锁模OEO的重复频率、脉冲宽度、脉冲位置、中心频率等参数的调控技术进行了研究(图2e)^[27-29]。



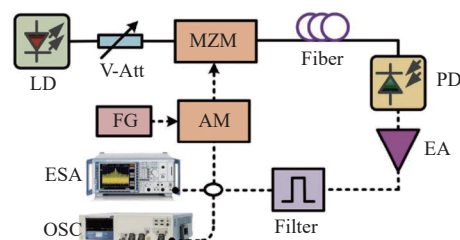
a. 延迟匹配注入锁定OEO



b. 基于互注入锁定的相参双频OEO



c. 傅里叶域锁模OEO



d. 主动锁模OEO

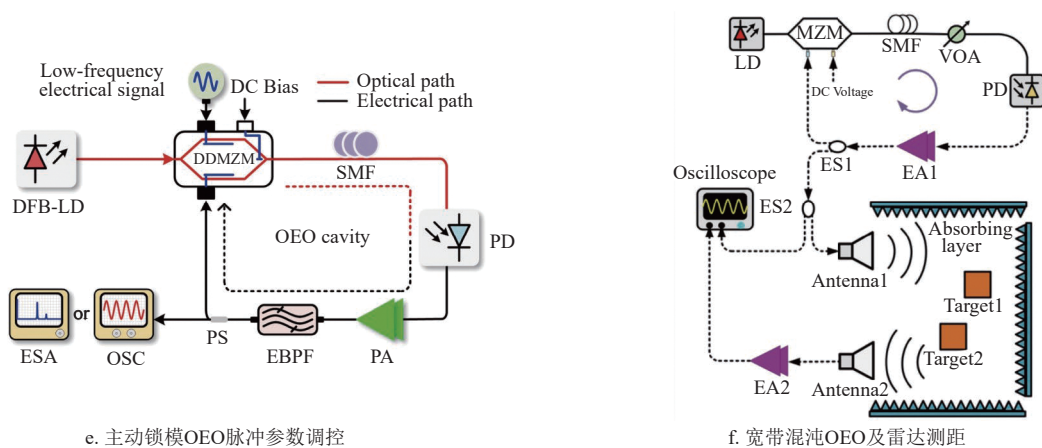


图 2 基于 OEO 的微波光子信号产生代表性技术

除了上述工作在线性区的 OEO 外, 研究中心还对工作非线性区的宽带 OEO 开展了大量研究工作。其中, 基于宽带非线性 OEO 实现了具有低时延特征的超宽带混沌信号产生 (图 2f), 并利用所产生混沌信号实现了高精度雷达探测和增强学习的加速运算^[30]。提出了基于宽带非线性 OEO 的外部触发超宽带脉冲产生方法, 实现了重复频率、脉冲位置、脉冲分布、脉冲形态等参数可控的超短电脉冲和电脉冲簇产生, 为神经形态再生记忆存储和超宽带冲激雷达探测提供了全新的技术途径^[31-32]。

未来, OEO 的发展将围绕集成化、智能化与多功能融合三大趋势展开。集成化依托硅光与薄膜铌酸锂, 推动 OEO 从分立系统向芯片级演进, 满足机载、星载轻量化需求。智能化结合可调谐器件与机器学习, 实现频率捷变与自适应补偿, 在复杂环境中保持最优振荡。多功能融合则突破单一信号源, 与光计算、传感及记忆单元融合, 形成集产生、处理、存储于一体的光电微系统, 为下一代超宽带无线通信、高分辨率雷达及认知电子战提供可重构射频前端, 推动微波光子学从“性能展示”走向“系统重构”。

2.2 微波光子信号传输

微波光子传输技术凭借光纤低损耗、大带宽和抗电磁干扰等优势, 成为实现宽带微波信号远距离分发的关键技术, 在雷达组网、深空探测及下一代宽带无线通信等领域具有重要应用价值。研究中心长期深耕该领域, 围绕稳时稳相传输、高功率光载射频 (radio over fiber, RoF) 链路及信能共传三大核心方向开展了系统研究, 形成了从基础理论到工程应用的完整技术链条, 为分布式相参系统等提供了关键技术支撑。

在稳时稳相传输方面, 团队聚焦光纤链路时延漂移补偿难题, 从测量方法、补偿技术到系统验证形成了完整的研究体系。测量方法上, 提出了基于互补扫频光和频移去斜的调频连续波光延时测量方案, 在光域实现移频去斜接收并辅以光相位噪声抑制, 实现了 1 km 光纤延时测量, 阿伦偏差达 $0.02 \text{ ps}@220.8 \text{ Hz}$ (图 3a)^[33]。进一步, 针对相位式激光延时测量技术的周期模糊问题, 提出了基于游标效应的多音信号探测与相干低频接收方案, 同时实现了高接收灵敏度与宽无模糊测试范围, 深入研究了多音调制测试中互调失真引入的周期性误差以及相干低频探测引入的光相位噪声误差, 提出了抗噪声技术, 在 10 km 光纤长度下实现 $0.5 \text{ fs}@266 \text{ Hz}$ 的测速精度 (图 3b)^[34-35]。补偿技术层面, 研制出延时补偿样机, 精度优于 $\pm 0.1 \text{ ps}$, 刷新率 $\geq 1 \text{ kHz}$ 。系统研究方面, 研制了两节点星型网络稳相传输样机, 传输距离超 20 km, 延时稳定精度达 80 fs, 为分布式相参雷达、无线通信基站等多节点协同系统提供了核心硬件支撑。

在高功率 RoF 链路方面, 研究中心针对光电探测器直驱天线的极简基站架构需求, 攻克了受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 的核心瓶颈。首先系统表征了 SBS 引发信号幅度、相位退化的物理机理, 明确噪声抑制关键参数; 进而提出了细颗粒度光谱调控策略, 通过电域精细光谱调控实现了信号光功率谱密度再分配, 有效抑制了 SBS 诱导的信噪比恶化 (图 3c 和图 3d)^[36-37]。在此基础上, 进一步提出了基于法布里-珀罗激光器 (FP-LD) 的粗颗粒度光谱调控方案, 利用 FP-LD 天然多纵模结构实现了更宽的光谱铺展, 将 SBS 阈值提升 11 dB, 支持长距离高功率

传输下光电探测器直接驱动天线的极简射频前端(图 3e)^[38]。此外, 引入级联强度-相位调制方

案, 推动极简基站架构从单一传输向通信感知融合方向演进^[34]。

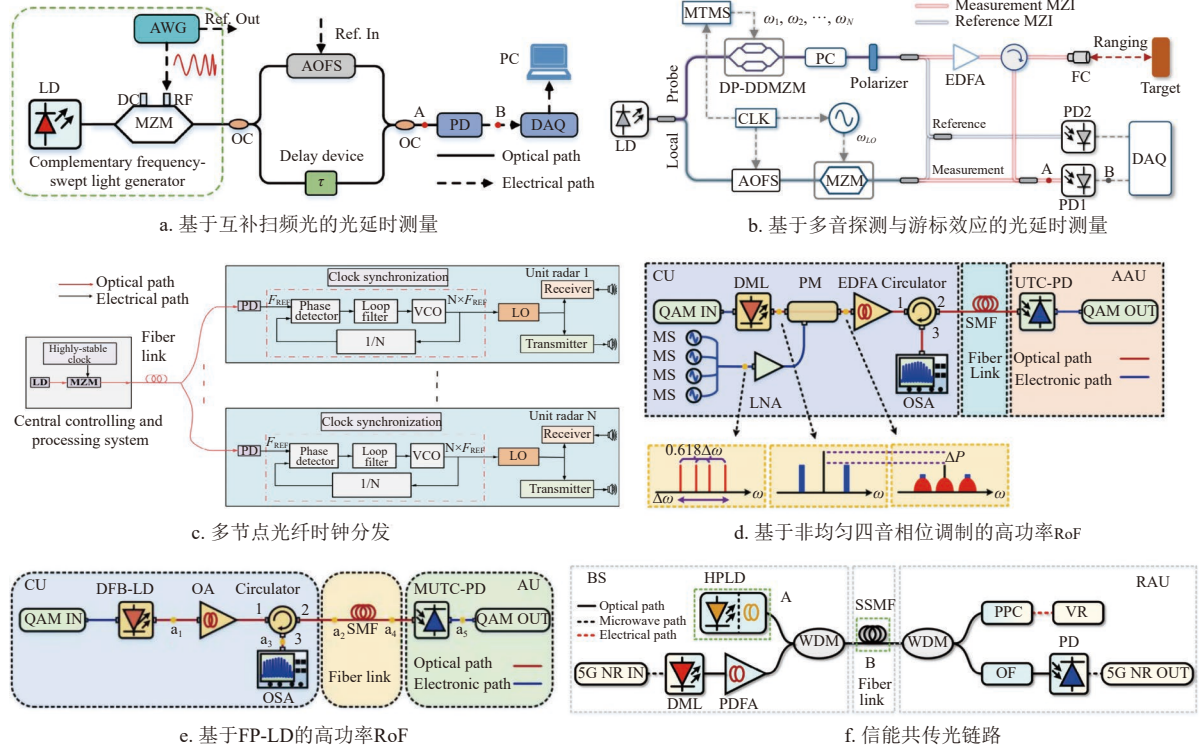


图3 微波光子信号传输的稳时稳相、高功率 RoF 与信能共传技术

信能共传方面, 团队探索了光纤同时承载高速通信信号与高功率能量光的可行性, 以解决远端节点供电难题。基于标准单模光纤, 实验验证了单通道 500 MHz 带宽 5G 新空口信号与 12 W 能量光的共传, 证实了标准单模光纤上同时实现高速数据通信和远端光供电的可行性, 为 6G 网络极简射频前端的能源供给提供了光纤一体化解决方案(图 3f)^[39]。

未来, 微波光子传输技术将朝着更高功率、更长距离、更高精度和更强功能融合方向演进。稳时稳相传输需发展亚飞秒级精度的实时监测与补偿技术, 降低系统复杂度与成本; 高功率传输需突破 SBS 等非线性效应物理极限, 探索新型调制格式、特种光纤和分布式增益调控; 信能共传需提升能量传输效率与距离, 兼容多波段通信信号。更为深远的是, 微波光子传输需与感知、计算、控制等功能进行深度融合, 实现“传输即感知、传输即计算”的一体化光载无线系统, 将成为后 5G/6G 时代的重要发展方向。

2.3 微波光子信号处理

微波光子信号处理技术利用光子学手段在光域

对微波信号进行处理, 突破了传统电子技术在带宽、速率、实时性等方面的物理瓶颈, 在宽带通信、电子对抗和雷达等领域具有重要价值。研究中心长期深耕微波光子信号处理领域, 形成了从宽带信号数据采集、模拟域处理到信号参数提取的完整技术链条, 为下一代宽带微波信息系统提供了技术支撑。

在宽带微波信号采集方面, 主要研究高速高精度光学模数转换(analog-to-digital conversion, ADC)技术, 涵盖光学时间拉伸 ADC 与光采样 ADC 两大方向。光学时间拉伸 ADC 利用光学色散效应, 对微波信号进行降频和带宽压缩预处理, 从而等效提升后端电子 ADC 的采样速率与模拟带宽(图 4a)^[40]。提出采用耗散孤子光源, 并结合非对称马赫-曾德尔电光调制器或互补单边带调制结构, 有效克服了传统光学时间拉伸 ADC 面临的三大瓶颈: 脉冲包络信号失真、调制非线性失真, 以及色散功率代价^[41], 并研制了宽带光学时间拉伸 ADC 原理样机, 实现了 25 GHz 模拟带宽与 87.7 GSa/s 等效采样速率(图 4b)。

光采样 ADC 利用低时间抖动超短光脉冲对微波信号进行直接采样, 可突破电子 ADC 因时钟抖

动导致的高频信号采样精度下降瓶颈(图 4c)^[42]。为实现高精度光采样,基于薄膜铌酸锂工艺平台,研制了无谐振腔超短光脉冲源芯片,并提出了光脉冲自启动与性能优化技术;为突破采样速率限制、扩展瞬时带宽,研究了多通道时间交织光采样架构(图 4d)^[43]。在此基础上,研制了宽带光采样 ADC 样机,采样速率 20 GSa/s,模拟带宽 40 GHz,有

效位数优于 7 位,具备一键自启动与自校准功能。此外,将光采样技术应用于微波信号测量领域,提出了互质多通道光采样的微波频率测量方法,实现了宽带微波信号的高精度频率测量;利用光采样的下变频特性,提出了基于低速光采样的电光强度调制器幅频响应测试方法,且无须对光电探测器进行额外校准^[44-46]。

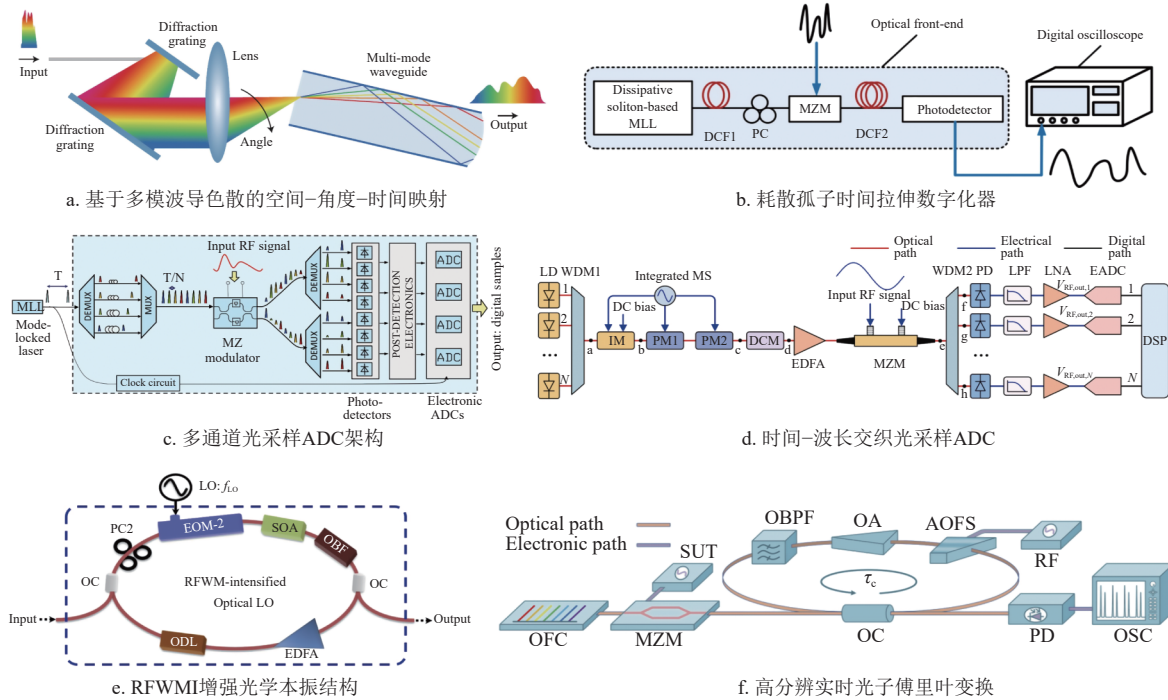


图 4 微波光子信号处理的光学采样、变频与实时分析技术

在微波信号处理方面,提出了基于并联电光调制的微波变频方法,实现了宽频范围微波信号的灵活变频^[47];为提高变频转换效率,分别提出了基于循环四波混频与相向循环移频的微波光子变频方法,有效降低了变频损耗(图 4e)^[48]。此外,深入研究了微波光子模拟域实时处理技术,以缓解后端数字域处理的压力,提出了基于光学移频环的高分辨率实时傅里叶变换方案,频率分辨率达 20 kHz,处理延时为微秒量级(图 4f)^[49]。

未来,微波光子信号处理技术将朝着更高带宽、更低功耗与更深融合方向演进。光采样 ADC 需突破集成化与光电接口不匹配的问题,研制宽带光采样保持芯片;实时频谱分析需进一步提升分辨率与瞬时带宽,实现亚微秒级宽带信号认知;模拟域光子相关与变频处理需与数字信号处理深度协同,降低系统复杂度。更为深远的是,微波光子信号处理需与传输、计算等功能进行有机融合,

构建“传输即处理、处理即计算”的光电融合智能系统。

3 核心支撑层: 高速光电子芯片与器件的表征测试

高速光电集成器件已经成为宽带通信、高性能计算、智能感知等新一代信息技术系统的基石,其技术进步与应用普及正在重塑信息基础设施的形态与效能,并深刻影响着人工智能的演进路径与规模边界。当前,光电集成技术正朝着光电近封装(near-package optics, NPO)与光电共封装(co-packaged optics, CPO)持续演进。该技术通过将光芯片与 AI 芯片在物理上紧密靠近,甚至直接集成于同一封装体内,有效突破了传统可插拔光模块在功耗、带宽密度及空间布局上的瓶颈,已成为支撑 AI 算力基础设施的关键互连方案。

光电子芯片测试属于光电集成芯片制造技术体系中的重要环节, 贯穿芯片设计、工艺流片、器件封装和系统应用全流程。在光电子芯片测试方面, 一般通过光纤耦合至分立的光/电或电/光标准模块(或者光波元件分析仪)进行电学扫频, 以获得小信号线性频响, 如调制/探测带宽, 但是需要额外校准消除辅助测试模块的影响^[50-51]。现有系统多为分立设备集成, 体积庞大、成本高昂, 难以实现多维频响参数、高精度、高效率片上测试。以电光调制芯片为例, 测试需要模斑变换器、晶圆解理或特定偏振态控制, 芯片波导与光纤耦合对准耗时费力, 检测和测试成本占比超 30%^[52-54]。相比之下, 微电子芯片经过近 70 年的发展, 在器件完成之前可以进行片上针测(probing test), 获得芯片性能和缺陷信息, 预测器件最终性能, 检测和测试成本仅为 5% 左右, 大大提升了集成电路制造的质量和良率^[55-56]。

面向光电融合技术趋势, 电子科技大学光电科学与工程学院提出了光电频谱映射方法, 演示了高速光电子器件频响解耦与自校准测试^[57-62]、晶圆级高速光电子芯片本征参数测试^[63-67]和微波光子器件大/小信号动态频响测试^[68-70], 这种将光域和电域全部变换到电域的光电融合测试方式为高速光电子芯片与器件提供全面、准确、多维表征新方案。

3.1 基于光采样的晶圆级片上非侵入式测量

高速光电子器件典型测试系统如图 5a 所示, 包括光源(laser diode, LD)、电光调制器(electro-optic modulator, EOM)、光电探测器(photodetector, PD)和微波网络分析仪(microwave network analyzer, MNA), 假设 MNA 微波源输出的调制信号为 $v_1(t) = V_1 \sin(\omega_1 t)$, 电光调制信号表示为:

$$E(t) = \frac{E_0 e^{j\omega_0 t}}{1 + \gamma} \{ \gamma + \exp[jm_1 \sin(\omega_1 t) + j\varphi_b] \} \quad (1)$$

式中, E_0 和 ω_0 分别为光载波的幅度和角频率; γ 和 φ_b 代表 EOM 的分光比和直流偏置; m_1 对应 ω_1 的调制系数, 其与半波电压 V_π 的关系为:

$$m_1 = \frac{\pi V_1}{V_\pi(\omega_1)} \quad (2)$$

对式 (1) 进行贝塞尔展开, 得到电光调制信号的光谱为:

$$I(\omega_0 + k\omega_1) = \frac{E_0^2}{(1 + \gamma)^2} \begin{cases} 1 + 4\gamma J_0(m_1) \cos \varphi_b + 4\gamma^2 J_0^2(m_1) & p = 0 \\ 4\gamma^2 J_1^2(m_1) \sin \varphi_b & p = \pm 1 \\ 4\gamma^2 J_2^2(m_1) \cos \varphi_b & p = \pm 2 \\ 4\gamma^2 J_3^2(m_1) \sin \varphi_b & p = \pm 3 \\ \vdots & \vdots \end{cases} \quad (3)$$

式中, $J_k(\cdot)$ 为 k 阶一类 Bessel 函数, 从式 (3) 可见, 电光调制产生的光谱中, 除了光载波外, 还有一阶光边带、二阶以及更高阶的光边带, 这些边带服从 Bessel 函数分布并且与光调制器的偏置相位有关。由此说明, 电光调制过程中产生明显非线性且由调制深度和偏置决定。

将电光调制信号送入光电探测器进行光电转换, 并经 MNA 测量接收机检测, 得到光电流表示为:

$$i(t) = \frac{RE_0^2}{(1 + \gamma)^2} \{ 1 + \gamma^2 + 2\gamma \cos[m_1 \sin(\omega_1 t) + \varphi_b] \} = \frac{RE_0^2}{(1 + \gamma)^2} \left\{ 1 + \gamma^2 + 2\gamma \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(m_1) \cos(k\omega_1 t + \varphi_b) \right\} \quad (4)$$

式中, R 为高速光电探测器 (high-speed photodetector, HSPD) 的响应度。电谱中的频率成分表示为:

$$\frac{i(\text{DC})}{R(\text{DC})} = \frac{E_0^2}{(1 + \gamma)^2} \{ 1 + \gamma^2 + 2\gamma J_0(m_1) \cos \varphi_b \} \quad (5a)$$

$$\frac{i(k\omega_1, t)}{R(k\omega_1)} = \frac{2\gamma E_0^2 J_k(m_1)}{(1 + \gamma)^2} \cos\left(\varphi_b + k\frac{\pi}{2}\right) \cos(k\omega_1 t) \quad (5b)$$

对比式 (3) 和式 (5) 发现, 调制光边带 $\omega_0 + k\omega_1$ 变换到了电谱频率 $k\omega_1$ 处, 但光载波变换成分为直流, 导致电谱信息中缺失了调制光载波信息。同时, 受到光电探测器响应度参数 R 的影响, 仅从电谱频率边带 $k\omega_1$ 无法恢复调制光谱信息, 即无法获得不受光电探测器响应参数影响的光谱电谱映射。

为了在电域中观测到不受光探测器响应度参数影响的光谱映射成分, 本方法引入额外的导频调制, 即在调制器偏置端加载低频导频信号 $v_p(t) = V_p \sin(\omega_p t)$, 如图 5b 所示。此时, 式 (4) 将变为:

$$i(t) = RE_0^2 \left\{ 1 + \gamma^2 + 2\gamma \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_n(m_1) J_k(m_p) \cos(n\omega_1 t + k\omega_p t + \varphi_b) \right\} \quad (6)$$

其电域中导频信号成分 ω_p 的幅值可表示为:

$$i(\omega_p; m_1, m_p) = 2\gamma R(\omega_p) E_0^2 J_0(m_1) J_1(m_p) \sin \varphi_b \quad (7)$$

对比式 (5a) 和式 (7) 可以发现, 导频调制状态下的电光调制光载波被映射到导频成分 ω_p 处, 图 5c 展示了不同驱动功率下的典型光调制谱低频映射。因此分析调制与未调制状态下导频成分 ω_p 幅值的变化 $J_0(m_1)$ 可计算获得 EOM 的调制频响参数 m_1 , 如式 (8) 所示:

$$H(m_1) = \frac{i(\omega_p; m_1, m_p)}{i(\omega_p; 0, m_p)} = J_0(m_1) \quad (8)$$

图 5d 中左侧展示了典型的调制与未调制状态下导频成分 ω_p 幅值, 根据式 (8) 即可得到待测

EOM 的调制系数, 然后利用调制系数和半波电压的关系可以得到待测器件的频率响应。图 5d 中右侧展示了本方法与电光扫频 (electro-optic swept frequency, EOFS) 法的测试结果对比, 两者一致性较好。值得注意的是, 电光扫频法需要额外校准辅助 HSPD 的频响, 而导频调制可以将光载波变换到低频 (<100 MHz) 附近的映射, 具备从低频频谱中分析高速电光调制器超宽带响应的能力, 几十兆赫兹检测带宽的低速光电探测器 (low-speed photodetector, LSPD) 就可实现几十甚至上百吉赫兹的高速光电子器件自校准测试, 节省了光探测器 90% 以上的带宽。

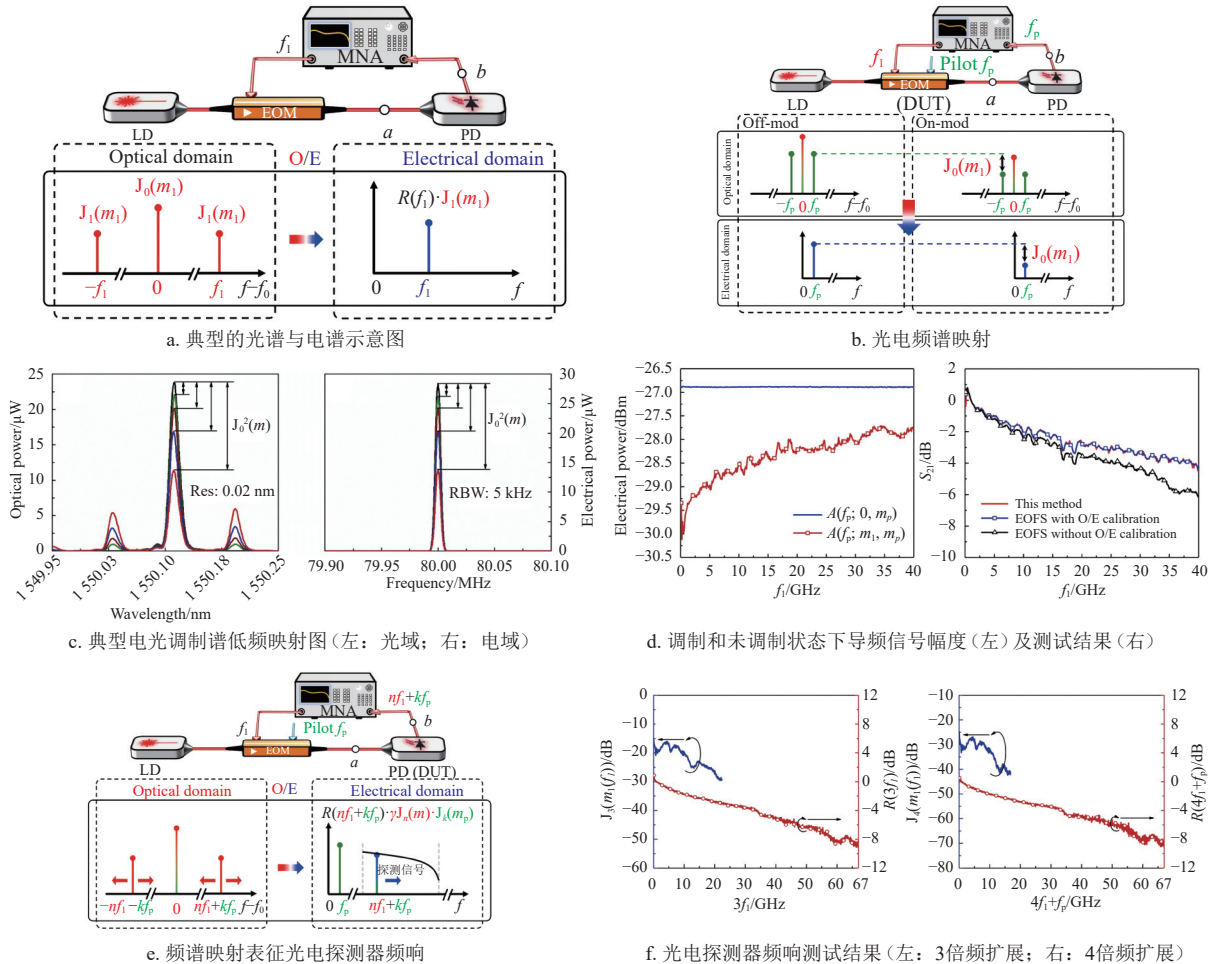


图 5 高速光电子器件的光电频谱映射原理及自校准频响测试

针对光电探测器频率响应测试, 从式 (6) 中可以发现, EOM 产生的电光调制光谱中高阶光边带映射到电域内的高频成分 $n\omega_1 + k\omega_p$, 其幅值耦合了 EOM 射频端、偏置端以及 PD 的频率响应, 如式 (9) 所示:

$$i(n\omega_1 + k\omega_p; m_1, m_p) = 2\gamma R(\omega_p) E_0^2 J_n(m_1) J_k(m_p) \cos\left(\varphi_b + \frac{n+k}{2}\pi\right) \quad (9)$$

利用式 (8) 可以提取得到 EOM 的调制系数 m_1 , 随后计算得到 EOM 的高阶调制光谱响应

$J_n(m_1)$, 此时从 EOM 高阶调制光边带的映射成分 $n\omega_1+k\omega_p$ 的幅值 $i(n\omega_1+k\omega_p)$ 中将 EOM 的高阶调制光谱响应 $J_n(m_1)$ 扣除, 即可得到光电探测器的频率响应, 其测试原理图如图 5e 所示。

从式 (9) 可以看出, 利用映射成分 $n\omega_1+k\omega_p$ 可以将测试频响范围扩展至辅助 EOM 驱动带宽的 n 倍。图 5f 展示了当 $n=3, k=0$ 和 $n=4, k=1$ 时, 高阶调制光谱响应 $J_3(m_1)$ 、 $J_4(m_1)$ 和待测光电探测器频率响应测试结果。可以看出, 当使用频谱映射时, 对于 67 GHz 的宽带测试需求, 3 倍和 4 倍频谱映射分别使辅助 EOM 的驱动带宽降低到了约 22.30 GHz 和 16.75 GHz。当面向更宽带的测试场景时, 还可以采用更高阶映射, 具备良好的拓展性。

3.2 高频自校准与链路器件频响解耦

前文介绍了基于导频调制的光谱到电谱频谱映射, 展示了在实现电光/光电频响解耦的同时, 仅

用低速光电检测和窄带电光驱动便分别完成了宽带电光频响和光电频响的测试。在面向晶圆级高速光电子芯片时, 由于片上测试环境的复杂性, 测试网络通常包含了微波探针 (Probe)、Bias Tee 等夹具, 如图 6a 所示。为实现高速调制和探测, EOM 芯片和 PD 芯片都采用微波探针与 MNA 连接, 实现仪器同轴端口到芯片共面波导端口的转换。对于 EOM 芯片测试, 通过低速大光敏面光电探测器 (large photosensitive area photodetector, LPA-PD) 空间光耦合检测 EOM 芯片输出的低频分量, 可显著提高光耦合效率; 对于 PD 芯片测试, Bias Tee 用于给芯片施加电压偏置。由于微波探针等夹具会造成微波信号的衰减, 且芯片与适配网络的阻抗匹配通常不理想, 会造成微波信号在芯片、适配网络和测试仪器之间来回反射, 影响测试精度。因此, 为获取芯片本征频率响应, 需要对适配网络进行去嵌。

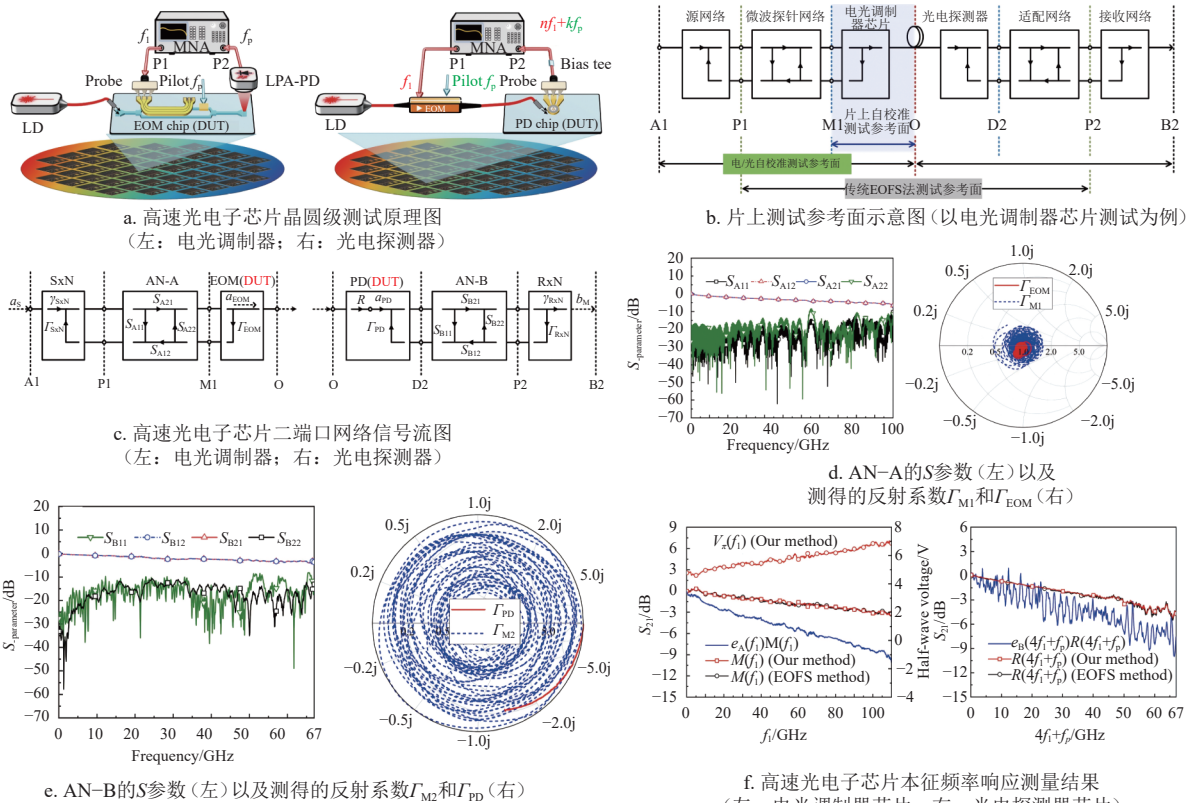


图 6 晶圆级高速光电子芯片的微波去嵌与本征频响测试

图 6b 展示了以电光调制器芯片为例的测试参考面, 传统光电测试参考面为 P1-P2, 包含了微波探针网络 P1-M1、电光调制器芯片 M1-O、光电探测器 O-D2 三者的共同响应。通过前述自校准测试, 参考面从 A1-B2 移动到 A1-O, 而片上微波适

配网络去嵌进一步将测试参考面从 A1-O 移动到 M1-O。同理, 对光电探测器芯片亦然。

为了分析微波信号从信号源到待测芯片之间的传输情况, 分别构建了 EOM 芯片和 PD 芯片的信号流图, 如图 6c 所示。其中, S_{xN} 和 R_{xN} 分别为

EOM 芯片测试系统的源网络和 PD 芯片测试系统的接收机网络, γ_i 和 Γ_i ($i=\text{SxN}, \text{RxN}$) 分别表示源网络和接收机网络内部的插入损耗和反射系数, 这两对参数可通过对微波网络分析仪校准得到; AN-A 和 AN-B 则分别为连接 EOM 芯片和 PD 芯片的适配网络 A 和适配网络 B, S_{Aij} 和 S_{Bij} ($i=1, 2; j=1, 2$) 分别表示这两个适配网络的 S 参数; Γ_{EOM} 和 Γ_{PD} 分别表示 EOM 芯片和 PD 芯片的反射系数, a_{S} 表示信号源输出的功率波, 可通过功率校准直接测量得到^[71], a_{EOM} 表示 EOM 芯片电端口

$$e_{\text{A}} = \frac{a_{\text{EOM}}}{a_{\text{S}}} = \frac{\gamma_{\text{SxN}} S_{\text{A}21}}{1 - \Gamma_{\text{SxN}} S_{\text{A}11} - \Gamma_{\text{EOM}} S_{\text{A}22} + \Gamma_{\text{SxN}} S_{\text{A}11} \Gamma_{\text{EOM}} S_{\text{A}22} - \Gamma_{\text{SxN}} S_{\text{A}21} \Gamma_{\text{EOM}} S_{\text{A}12}} \quad (10a)$$

$$e_{\text{B}} = \frac{b_{\text{M}}}{a_{\text{PD}}} = \frac{S_{\text{B}21} \gamma_{\text{RxN}}}{1 - \Gamma_{\text{RxN}} S_{\text{B}22} - \Gamma_{\text{PD}} S_{\text{B}11} + \Gamma_{\text{RxN}} S_{\text{B}22} \Gamma_{\text{PD}} S_{\text{B}11} - \Gamma_{\text{RxN}} S_{\text{B}21} \Gamma_{\text{PD}} S_{\text{B}12}} \quad (10b)$$

式中, e_{A} 和 e_{B} 分别是调制端和探测端适配网络的退化响应。值得注意的是, 当待测芯片和适配网络具有良好匹配时, 分母所代表的阻抗失配响应可以忽略, 只需考虑分子项代表的适配网络衰减。根据 3.1 节中式 (9) 得到的调制系数 m_1 , 可得 EOM 芯片的半波电压为:

$$V_{\pi}(f_1) = \pi \frac{|a_{\text{EOM}}| \sqrt{Z_0}}{m_1} = \pi \frac{|a_{\text{SE}}| \sqrt{Z_0}}{m_1} \quad (11)$$

对于 PD 芯片, 在用接收机测量得到功率波 b_{M} 后, 根据退化响应 e_{B} 计算出 PD 芯片输出的功率波 a_{PD} , 再基于式 (10) 扣除辅助调制器的高阶调制光谱响应 $J_n(m_1)$, 最终计算出 PD 芯片的本征频率响应。

图 6d 展示了适配网络 A 的 S 参数和 EOM 芯片反射系数测量结果。适配网络 A 由 1.0 mm 同轴电缆和微波探针连接构成。根据芯片反射系数 Γ_{EOM} 测量结果, 芯片阻抗约为 47Ω , 由于适配网络寄生效应增加了负载的阻抗失配, 测量曲线 Γ_{M1} 更加偏离圆图中心的匹配点。

PD 芯片测试中, 其偏置在 -2V。PD 芯片所连适配网络 B 仅包括微波探针。图 6e 则分别展示了适配网络 B 的 S 参数和测得芯片反射系数。由于 PD 芯片没有做阻抗匹配, 其反射接近开路。而适配网络的传输线效应导致测量曲线 Γ_{M2} 存在额外的相位旋转, 其插入损耗则使得旋转曲线逐渐向中心靠拢。其中, 图 6f 左侧和右侧分别展示了导频和谐波映射法测量 EOM 芯片和 PD 芯片本征频响的结果。相比于 EOFs 法, 导频法只需兆赫兹量级检测带宽, 实现达 110 GHz 范围 (f_1) 的 EOM 芯片频响测量, 并且低频检测的特性使得采用 LPA-PD

处的入射功率波, a_{PD} 表示 PD 芯片电端口处的出射功率波, R 表示 PD 芯片的频率响应, b_{M} 表示接收机直接测量的功率波。

在微波探针的共面波导端口分别接短路、开路、负载和待测芯片 (short-open-load-device, SOLD), 测得相应的反射系数分别为 Γ_{MS} 、 Γ_{MO} 、 Γ_{ML} 和 Γ_{M} , 可计算出适配网络的 S 参数和待测芯片的反射系数 Γ_{DUT} ^[63, 65]。在图 6c 信号流图的基础上, 建立直接测量得到功率波与待测芯片端口处的功率波之间的关系:

的空间光探测成为可能, 以提高光耦合效率, 有助于快速晶圆级探测; 谐波映射法只需 16.75 GHz 的驱动带宽 (f_1), 就能实现 67 GHz 范围 PD 芯片频响测量, 大幅降低辅助 EOM 驱动带宽要求。红色曲线和蓝色曲线分别对应待测光电子芯片的本征频响和未去嵌适配网络的频响测试结果。显然, PD 芯片去嵌前的测试结果起伏更大, 这表明当芯片未做阻抗匹配时, 必须考虑阻抗失配的影响。

3.3 多维关键参数的高分辨精确提取

前面通过光电频谱映射实现了高速光电子器件的自校准测试, 同时结合微波去嵌入技术演示了晶圆级高速光电子芯片的本征频响测试。除小信号频响参数以外, 在高功率场景中, 大信号工作状态下的微波光子器件三阶交调失真 (IMD3) 特性同样值得关注。为了实现微波光子器件多维度参数表征, 本节以 PD 为例, 演示了一种大/小信号动态频响一体化测试方案, 原理图如图 7 所示。测试系统主要由两个并联的光强度调制链路构成, 具备同时测试 PD 小信号频响与大信号频响的能力, 对应状态 S1 与 S2。

如图 7a 所示, 当测试系统处于 S1 状态时, 此时仅有 EOM1 输出的调制光信号被注入待测 PD 中, 同时 EOM1 的直流偏置端被加载的定频导频信号 f_p 所调制。由式 (8) 和式 (9) 可知, 在 EOM1 处于调制和未调制状态下, 监测待测 PD 输出导频信号 f_p 处的幅值变化可以确定 EOM1 的调制系数 m_1 , 进而计算得到各阶谐波 $nf_1 + kf_p$ 对应的调制频响 $J_n(m_1)$, 最后将实测的各阶谐波功率扣除对应阶次的调制频响, 可实现 PD 小信号线性频响的可扩展高频测试。

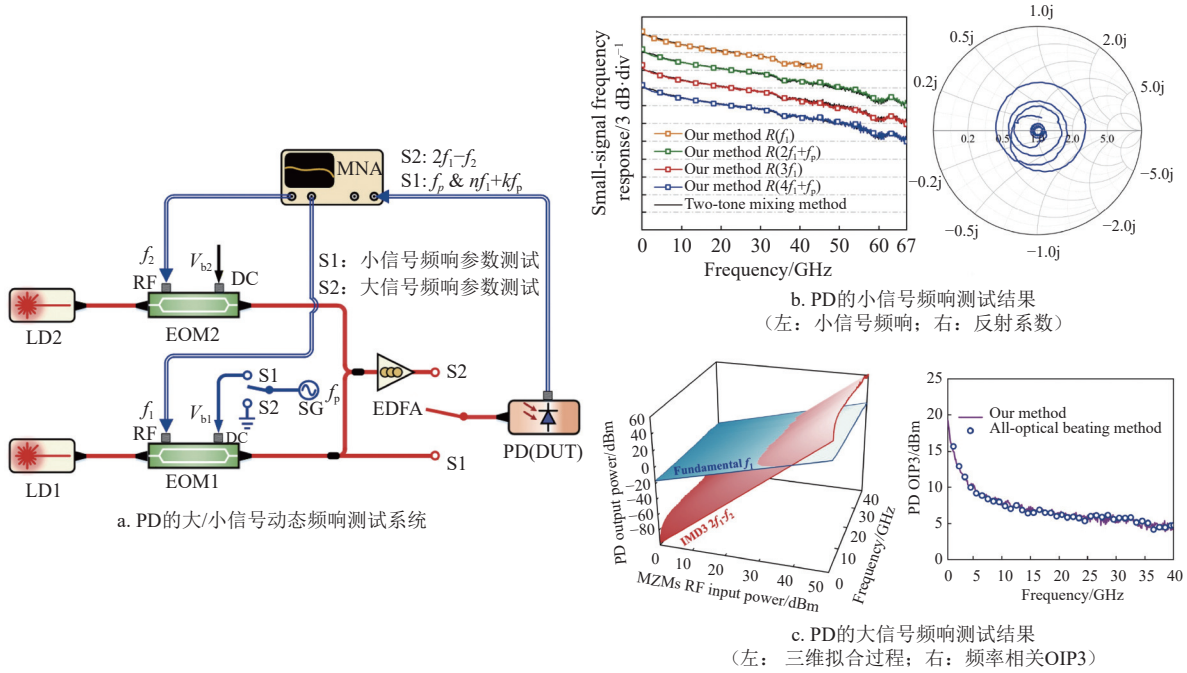


图7 光电探测器大、小信号动态频响的一体化测试与表征

当测试系统状态切换至 S2 时, 可实现 PD 的大信号频响测试。此时两路强度调制光信号将合路后注入待测 PD 中, 合路后的实际总光强激励信号 $I(t)$ 为:

$$I(t) = E_1^2 \left[1 + \gamma_1^2 + 2\gamma_1 \cos(m_1 \sin(2\pi f_1 t) + \varphi_{b1}) \right] + E_2^2 \left[1 + \gamma_2^2 + 2\gamma_2 \cos(m_2 \sin(2\pi f_2 t) + \varphi_{b2}) \right] \quad (12)$$

为了避免 EOM 非线性产生的杂散谐波的影响, 分析量化待测 PD 仅在理想双音光激励信号 f_1 和 f_2 下所产生的 IMD3, 对式 (12) 进行贝塞尔函数展开, 将展开后的一阶基频分量作为理想双音光激励信号 $I'(t)$, 表示为:

$$I'(t) = E_1^2 \left[1 + \gamma_1^2 + 4\gamma_1 J_1(m_1) \sin \varphi_{b1} \cos(2\pi f_1 t) \right] + E_2^2 \left[1 + \gamma_2^2 + 4\gamma_2 J_1(m_2) \sin \varphi_{b2} \cos(2\pi f_2 t) \right] \quad (13)$$

合路后的光激励信号经光放大器增大注入待测 PD 中的光功率, 使 PD 工作在线性区。PD 的非线性模型表示为:

$$i(t) \approx a_0 + a_1 [I(t) - \overline{I(t)}] + a_2 [I(t) - \overline{I(t)}]^2 + a_3 [I(t) - \overline{I(t)}]^3 \quad (14)$$

式中, $i(t)$ 为 PD 输出的光电流; $a_0 \sim a_3$ 分别表示 PD 的各阶非线性系数。分别将式 (12)、式 (13) 代入式 (14) 中推导得到: 当两个 EOM 均偏置在正交传输点时, 实际光激励下频率为 $2f_1 - f_2$ 的可测光电流 $i_{\text{Meas}}(2f_1 - f_2)$ 和理想双音光激励下待测 PD 的三阶交调失真 $i_{\text{IMD3}}(2f_1 - f_2)$ 为:

$$i_{\text{Meas}}(2f_1 - f_2) = 24a_3 E_1^4 \gamma_1^2 E_2^2 \gamma_2 J_2(2m_1) J_1(m_2) \quad (15a)$$

$$i_{\text{IMD3}}(2f_1 - f_2) = 48a_3 E_1^4 \gamma_1^2 E_2^2 \gamma_2 J_1^2(m_1) J_1(m_2) \quad (15b)$$

对比式 (15a) 和式 (15b) 可知, 实际光激励下的可测光电流 $i_{\text{Meas}}(2f_1 - f_2)$ 不仅包含了 PD 的 IMD3 响应 $i_{\text{IMD3}}(2f_1 - f_2)$, 还包含了调制杂散响应 $J_2(2m_1)/2J_1^2(m_1)$ 的贡献, 表示为:

$$i_{\text{Meas}}(2f_1 - f_2) = i_{\text{IMD3}}(2f_1 - f_2) \frac{J_2(2m_1)}{2J_1^2(m_1)} \quad (16)$$

可以看出, 在 S1 中通过导频辅助载波映射确定 EOM1 的调制系数 m_1 后, 即可借助式 (16) 将待测 PD 的 IMD3 从实测的光电流中提取出来。

实验中, 首先切换测试系统状态处于 S1, 设置导频信号频率为 80 MHz, 控制待测 PD 入射光功率为 4 dBm, 确保其工作在线性区, 以验证本方案的小信号频响测试能力。PD 的小信号频率响应分别在 1 倍频至 4 倍频情况下的测试结果如图 7b 左侧所示。可以看出, 1 倍频覆盖 45 GHz 测试范围, 2~4 倍频均可覆盖 67 GHz 测试范围, 对应光电调制端的带宽需求分别降至测试带宽的 1/2、1/3 与 1/4, 验证了该方法的可扩展高频测试能力。采用双音混频法作为对比, 测试结果高度吻合, 证明了该方法的准确性。此外, 实验还测试了 PD 在 67 GHz 范围内的反射系数, 如图 7b 右侧所示, PD 低频段阻抗匹配良好, 信号反射低; 随频率升

高, 反射系数逐渐偏离圆心, 阻抗匹配性下降, 符合实际器件特性。

随后, 将测试系统状态切换至 S2, 设置两路光载波的频率间隔约 125 GHz, 远大于待测 PD 带宽, 避免光域互调干扰。通过光放大器将待测 PD 入射光功率提升至 14 dBm, 使其工作在非线性区, 以验证大信号频响测试能力。实验分别测试 PD 输出的基频分量 f_1 与频率为 $2f_1-f_2$ 的可测光电流的电功率, 通过导频辅助载波映射提取 EOM1 调制系数 m_1 , 计算调制杂散响应并完成去嵌, 从而得到由 PD 自身非线性导致的 IMD3 功率。图 7c 展示了对不同功率下的基频与 IMD3 功率进行三维线性拟合与外推, 得到随频率变化的输出三阶交调截距点 (OIP3) 曲线, 实验以全光拍频法作为对比, 两种方法的测试结果一致性良好, 验证了该方法解耦并消除电光调制杂散的有效性, 实现了 PD 大信号频响的准确表征。

综上, 本研究基于光电频谱映射与微波去嵌入技术, 通过将光域光谱映射至电域电谱的光电融合测试思路, 成功实现了高速光电子器件的自校准测试、晶圆级高速光电子芯片本征参数测试, 以及微波光子器件大/小信号动态频响测试, 为高速光电子芯片与器件提供了全面、准确、多维表征新方案, 有望降低光电子芯片与器件的测试成本, 提升晶圆级测试效率, 为光电融合技术的发展提供核心技术支撑。

4 未来演进层: 新型光电融合材料/器件

4.1 低维铁电机理与存算一体光电融合器件

在后摩尔时代, 人工智能领域的算力需求呈现持续高速增长态势, 传统冯·诺依曼架构所固有的“功耗墙”与“存储墙”瓶颈进一步凸显: 数据在处理器与存储器之间的频繁往复搬运过程, 在系统总能耗占比极高, 而有限的存储带宽也成为严重制约数据密集型任务运行效率的核心因素^[72]。当前广泛应用于机器视觉与边缘智能场景的光电系统, 大多仍沿用“光信号探测—模数转换—数据存储—运算处理”各功能模块相互分离的传统架构, 系统的延迟与功耗在每一级信号转换与数据传输环节被逐级放大, 难以适配低功耗、高实时性的边缘智能应用需求^[73]。

通过在单一功能材料或单个器件单元内部实现

光信号的感知、非易失性存储与原位计算的一体化融合, 是突破上述两大技术瓶颈的一条极具可行性的技术路径。二维范德华铁电材料的出现, 为低维功能材料体系的发展开辟了全新方向: 相关研究证实, 铁电性在二维极限尺度下仍可保持稳定存在, 且其极化翻转行为可由层间滑移机制主导, 完全区别于传统铁电材料依赖离子位移的极化翻转模式。这种独特的“二维滑移铁电”机制从原理层面规避了传统铁电体系中普遍存在的缺陷电荷钉扎效应, 使得材料在原子级极薄的厚度下仍展现出极为优异的抗疲劳特性与稳定的极化保持能力^[73-74]。

本节以二维滑移铁电的核心物理机制为研究切入点, 系统梳理低维铁电材料在光电融合感知器件与类脑计算领域的最新研究进展, 同时对国内外其他研究团队在新型材料体系开发、高性能光电器件研制、大规模存算阵列构建等方向的代表性工作进展进行综述与讨论。

4.1.1 物理机制突破: 二维滑移铁电与“高抗疲劳”特性

二维滑移铁电性源于范德华晶体在特定堆垛(如 3R 或微小转角)下, 层间相对滑移引起的界面对称性破缺, 从而产生可电切换的面外极化^[73-75]。因此, 即便 h-BN、MoS₂ 及 WSe₂ 等原本非铁电的材料, 也能表现出稳健的滑移铁电^[12, 76]。与传统铁电依赖晶格畸变不同, 滑移铁电的层状限域阻止了带电缺陷跨层聚集, 显著抑制缺陷电荷钉扎, 赋予极薄器件突出的抗疲劳潜力。

近期, 刘富才团队报道了基于双层 3R-MoS₂ 的高抗疲劳体系(如图 8a 所示), 在经历 10⁶ 次极化翻转后仍无明显疲劳^[77]。该团队还揭示了层数依赖的多极化行为: 三层及以上材料因独立滑移涌现中间极化态, 总极化态数随层数呈 2ⁿ⁻¹ 指数增长^[78], 且铁电转变温度超 650 K。此外, 他们在转角氮化硼莫尔界面中观测到受限的 Bloch 型极化半子(meron), 并借助滑移机制实现了非易失调控^[79]。

其他低维铁电体系也取得重要进展: 香港城市大学 Han 等实现了 In₂Se₃ 铁电、顺电与反铁电多相的可控制备, 其 β' - α 异相结显著提升了存储性能^[80]; 华东师范大学褚君浩团队在 GeSe 中发现本征面外反铁电性及电场诱导相变^[81]; Jiang 等在 CIPS 中揭示 Cu⁺迁移形成的“四势阱”态, 实现了铁电至离子主导型导电的平滑过渡^[82]。这些工作表明低维铁电的极化起源具有高度多样性。

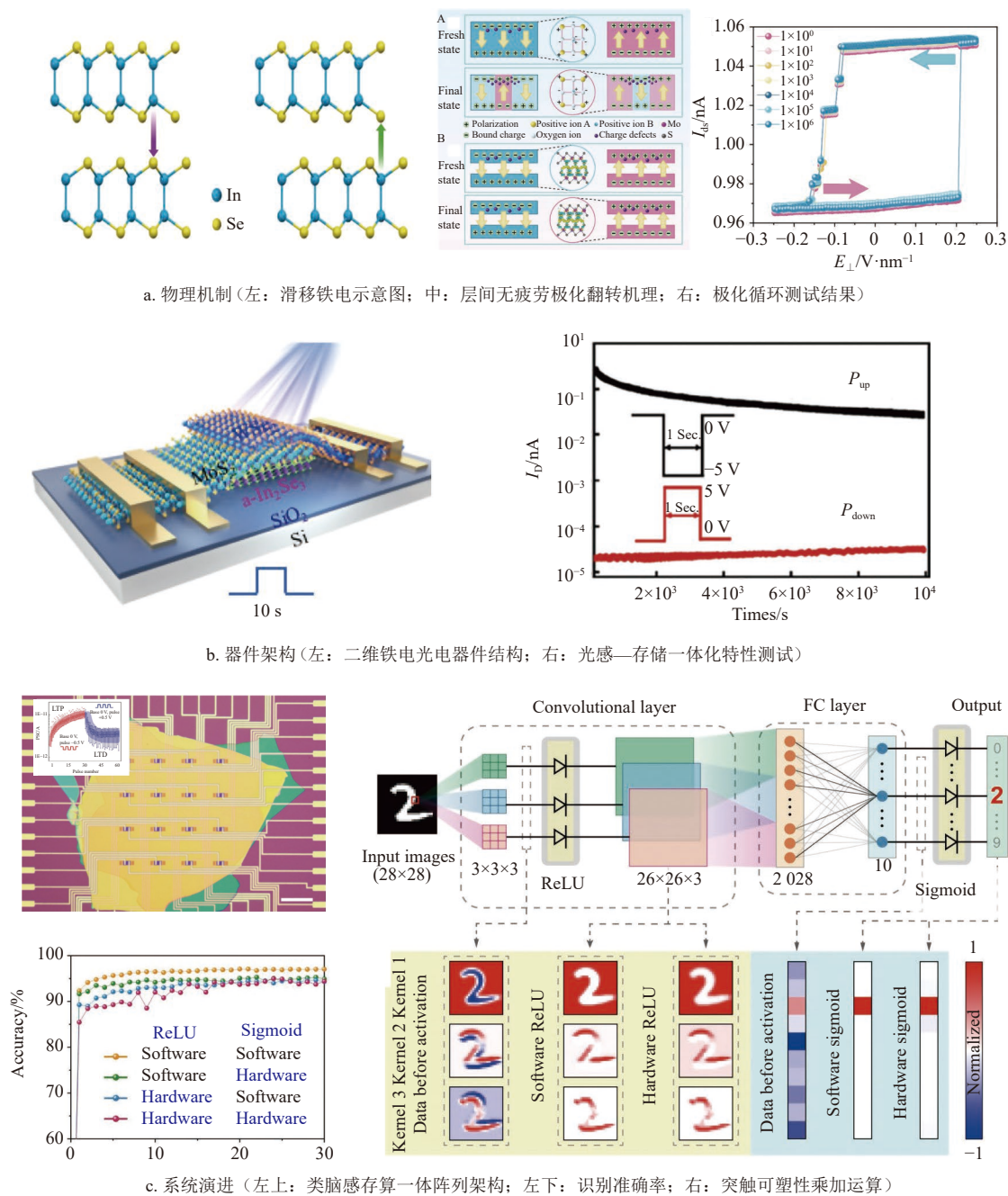


图 8 基于低维滑移铁电机理的光电融合与存算一体架构演进

4.1.2 器件架构创新: 基于二维铁电的光电融合器件

二维铁电半导体的自发极化内建电场可有效驱动光生载流子分离并动态调制势垒, 在提升光响应的同时赋予器件非易失性存储能力^[73] (典型结构见图 8b)。中国科学院微电子所刘明团队提出基于铁电畴工程的二维材料原位 p-n 同质结可编程调控方法^[83], 将突触权重以局域极化态非易失存储, 依托物理定律直接完成原位计算, 在单器件内实现了 51 个高线性度权重状态, 无须外接模块即可完

成图像识别。

在 CIPS 体系中, 刘富才团队通过铁电光伏行为识别出 Cu^+ 迁移主导的 3 种开关模式, 通过调控极化电压, 在单一器件内实现了数字存储、突触模拟与神经元积分功能^[84]。该团队进一步提出“可刷新忆阻器”, 在单一材料内动态分配铁电有序相与离子无序相, 实现硬件层面的类脑神经权重重用, 使图像识别准确率提升约 17%、功耗降 40%、多任务训练提速 22 倍^[85]。

复旦大学/中国科学院上海技物所王建禄、褚

君浩团队在 2H-MoTe₂ 中提出“可编程铁电掺杂畴图样”，实现偏振比连续可调的线偏振光探测，短路光电流达 29.9 A/cm²[86]。中国科学技术大学 Zeng 等在二维 CIPS 中观测到体光伏效应（BPVE），光电流密度比传统钙钛矿高两个数量级，凸显其在光伏器件中的潜力[87]。北京大学 Yang 等基于 α-In₂Se₃ 的光电耦合构建光电突触，其弛豫时间可由光/电调节，成功用于多模态储备池计算及图像识别预测[88]。

为进一步比较不同的有代表性的二维铁电材料体系的器件特征，表 1 汇总了各类材料体系的极化机制及器件特征等信息。从表 1 中可以看出，滑移型铁电（3R-MoS₂、h-BN）在耐久性与写入速度上表现突出，更适合高可靠非易失存储；α-In₂Se₃ 与

1T'-MoTe₂ 兼具铁电半导体性与较强的光响应，在光电融合感知方向独具优势；CIPS 可作为铁电介质层，同时其凭借 Cu⁺的有序-无序动力学实现多态可编程，更适合类脑突触的权重表达。就 CMOS 集成而言，二维铁电目前仍处于探索阶段：一方面，低热预算生长（3R-MoS₂ 的<300℃ 晶圆级路线）与全后道工艺集成（AlScN/二维沟道 FeFET）已获验证，α-In₂Se₃ 也可在硅衬底直接生长；另一方面，多数体系生长温度仍高于后道热预算，需依赖转移工艺，含 Cu⁺的 CIPS 与 Ni 衬底外延等还带来污染顾虑，晶圆级均匀性与阵列规模均有待提高。综合来看，降低合成温度并管控污染是二维铁电走向单片集成的主要课题，其前景取决于这些工艺问题的解决程度。

表 1 有代表性的铁电材料体系的材料及器件特性

材料体系	极化机制	工作温度	耐久次数	器件尺寸	写入电压	保持特性	阵列规模	CMOS 兼容性
3R-MoS ₂ ^[78, 89-92]	非对称堆垛致层间对称性破缺，层间电荷重分布产生净极化	室温，预期最高工作温度达>650 K（SHG在298~650 K 区间未消失）	>10 ¹¹ 次（3层，累计加电压>10 ⁶ s）	作沟道（平面型）：厚1.27 nm（双层）	写脉冲±10 V（100 ms）；窗口>8 V	>10 ⁴ s（器件实测，开关比>10 ⁶ ）；外推>10年	5×5（刚性）；5×5（柔性PET，弯折10 ³ 次）	高兼容预期：低温 MOCVD <300℃ 满足 BEOL 热预算；高温路线需转移
h-BN ^[12, 76, 93-94]	非对称堆垛致层间对称性破缺，层间电荷重分布产生净极化	室温（真空）；预期最高工作温度未报道（极化至室温，几乎与温度无关）	>10 ¹¹ 次（±3.1 V/100 ns/10 ⁷ Hz）	作铁电介质层：厚0.67 nm（双层）	写脉冲±3.1 V（100 ns）	>1个月	—	有待突破：高温外延、Ni衬底污染，硅基BEOL未实现
α-In ₂ Se ₃ ^[95-98]	离子位移型；面内-面外互锁	室温，预期最高工作温度>620 K（SHG信号于~620 K消失）	>10 ⁵ 次（+4 V/-7 V, 0.1 kHz, 读-0.7 V）	作沟道（平面型）：W(17.5 μm)×L(10 μm)、厚40 nm（FeCT）；作铁电层：厚40~130 nm	写脉冲+8V（40 ns, FeCT）；+4 V/-7 V（LG-FeFET）	约10 ² s（器件级）；薄片 PFM约10 ⁴ s；HfO ₂ 基>10 ⁶ s	3×3（光电突触晶体管阵列）；双器件堆叠验MAC	部分兼容：SiO ₂ /Si 直接生长，但 610℃超BEOL热预算
1T'-MoTe ₂ ^[99-102]	非对称堆垛致层间对称性破缺，层间电荷重分布产生净极化	室温（d1T单层实测）	—	单层d1T：厚约0.8 nm	-8 V（极化写入）	—	—	有待突破：未见晶圆级面积生长及器件报道
GeSe ^[81, 103]	面内离子位移型（单层，armchair 方向）；层间滑移致多重极化态	室温，预期最高工作温度达700 K（α-GeSe拉曼稳定至700 K）	—	—	—	—	—	有待突破：未见晶圆级面积生长报道
CIPS ^[85, 102, 104-105]	有序-无序型：Cu ⁺ 偏离中心有序化（C2/c→Cc）	室温，预期最高工作温度达315 K（块体TC实测）；FeFET>200 K响应下降	4×10 ⁶ 次（低场 1.7 E _C 下反常增强）	作铁电介质层（垂直夹层）：厚82 nm（MoS ₂ /CIPS/MoS ₂ ）；电极面积0.009 5~0.011 3 mm ²	写脉冲7~14.5 V（set）/-5~-6.6 V（reset）	>10 ³ s（器件5态电阻，开关比>10 ² ）；16态120 s；FePV光电流>10 ³ s；FeFET 2-bit 10 ³ s	—	有待突破：Cu ⁺ 迁移污染、未见晶圆级面积生长报道

4.1.3 系统级演进: 存算一体与类脑神经形态计算

为突破冯·诺依曼架构的数据搬运瓶颈,需将离散器件组织为大规模阵列,在感知端或存储阵列内就地处理信息,把数据移动压到最低^[72]。二维铁电光电器件凭借多态电导、低功耗及光电双模调控等特性,成为人工突触与存算阵列的有力候选,其关键在于将底层物理可塑性映射到阵列级的乘加运算中。

铁电畴切换可低能耗地模拟突触动力学^[72]。系统层面,人工突触交叉阵列(图8c)借助基尔霍夫定律与欧姆定律,在物理上直接完成神经网络核心的矩阵-向量乘加(MAC)操作^[83]。Fraunhofer/TUM团队基于多级 FeFET 交叉阵列实现完整多位乘加运算,能效达 885.4 TOPS/W^[106];韩国成均馆大学团队基于 α -In₂Se₃ 堆叠阵列验证了乘加运算^[96];刘富才团队基于 CIPS 忆阻器^[85]与刘明团队基于铁电同质结^[83],分别给出了感存算一体与神经重用的硬件范例。

应用层面,铁电神经形态器件可用于图像预处理、边缘检测与分类。如中科大团队基于 Pb(Zr,Ti)O₃ 铁电隧道结实现了 8 位高精度、线性的权重更新,神经网络识别准确率达 94.7%^[107]。二维铁电阵列同样潜力可观,其 4×4 忆阻器阵列推理准确率达 98.55%^[108];铁电光电传感器阵列更能在感知图像的同时将光强转为电导并即时加权求和,实现感存算一体的类脑视觉。

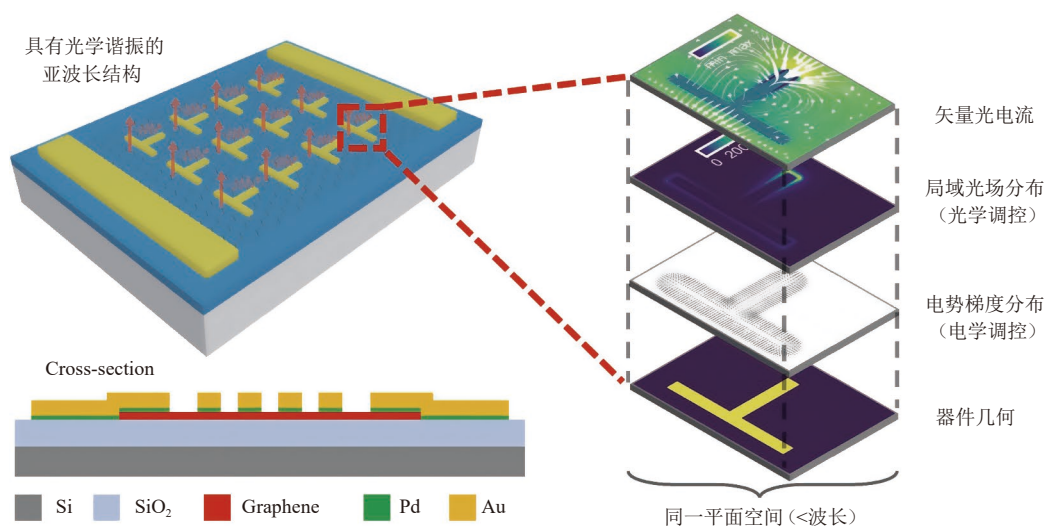
4.2 多维光电融合器件与应用

在人工智能与大数据技术飞速发展的时代背景

下,机器视觉、遥感探测、生物医学成像及自动驾驶等前沿领域对光场信息的获取提出了前所未有的高维度需求。偏振态、光谱分布、波前相位与空间角度等维度的光场信息蕴含着远超光强本身的丰富物理内涵,是实现复杂场景精确感知与理解的关键要素^[109-110]。

然而,传统光电探测器的工作原理根植于半导体材料的各向同性光吸收机制,其本征响应仅对入射光功率(光强)敏感,在本质上属于标量探测范畴。为获取偏振或光谱等高维信息,传统方案不得不在探测器前端叠加滤光片阵列、波片及棱镜等大量分立式光学元件,由此带来的系统体积庞大、装调复杂、色差串扰及成本高昂等问题,与现代光电系统追求微型化、片上集成化的发展趋势形成了根本性矛盾^[111-112]。如在光谱探测领域,传统微型光谱仪高度依赖干涉滤光片与干涉光学元件,严重制约了其光子效率、分辨率和光谱范围的提升^[113-115];在偏振探测领域,全 Stokes 参量的获取通常需要多个分立光学元件的复杂组合^[111, 116]。

有鉴于此,本节将以“光电融合”为核心理念,遵循“底层物理机理突破→片上无滤波器件构筑→多维系统级应用”的逻辑脉络,系统梳理近年来多维光电融合器件领域的重要进展,着重阐明如何通过材料、结构与器件的协同设计,赋予探测器对偏振、光谱等多维光场参量的内禀响应能力,从而实现高度集成化的智能感知系统(见图9)。



a. 机理层: 对称性破缺与光电响应新物理

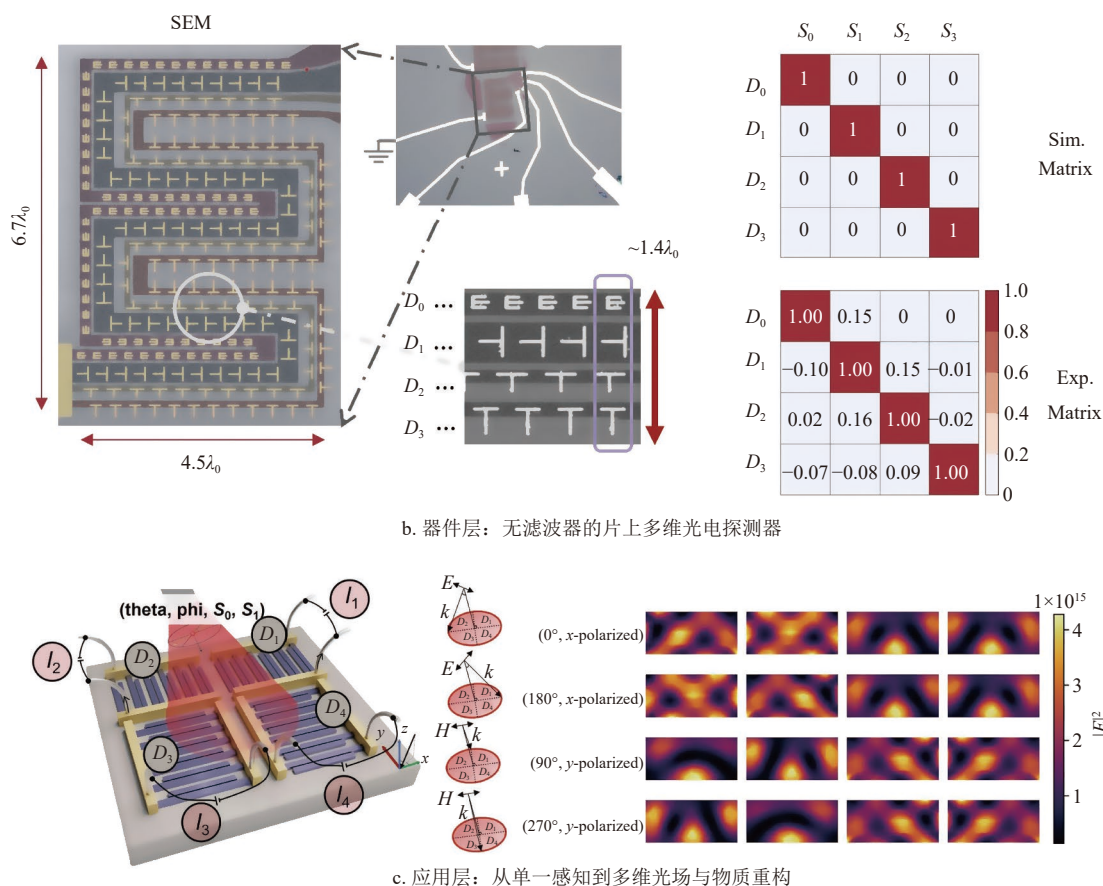


图 9 多维光电融合器件的演进路径：从底层物理机理到多维光场应用^[116-118]

4.2.1 机理层：对称性破缺与光电响应新物理

对称性是描述光与物质相互作用的基本语言，也是理解偏振光电响应物理起源的核心线索。围绕“对称性破缺如何孕育新的光电响应”这一主线，近年研究已从理论框架延伸至器件实证与光场调控。

理论上，有研究建立了以对称性分析为基石的统一框架^[119]，将偏振光电转换抽象为“光场信息→电子自由度→电学输出”的映射，并区分出标量与矢量两类响应：前者源于各向异性吸收，探测线偏振需低旋转对称性（ C_1 或 C_2 ）、探测圆偏振需破缺面内镜像对称以引入手性，由二阶光响应张量描述；后者的光电流方向与幅度均随偏振矢量变化，必要条件是中心对称性破缺，由三阶张量刻画，因而天然兼具线偏振与圆偏振探测能力。该框架进一步归纳出本征破缺（铁电体光伏效应、贝里曲率偶极）、外禀破缺（应变梯度、异质界面、非中心对称微结构）与外场诱导破缺（能谷霍尔、自旋光电流）3 条路径，使器件设计从经验试错走向理性

工程。

上述判据在人工体光伏效应中得到验证^[117]。通过在石墨烯表面构筑非中心对称 T 型金属天线阵列，人为破缺局域光场对称性，使热光生载流子形成非局域位移电流，在中心对称材料中再造出体光伏效应。器件零偏压下响应度大幅提升，等效噪声功率低至 $0.12 \text{ nW Hz}^{-1/2}$ ，并借三端口输出无歧义解算偏振角。后续研究进一步揭示^[120]，矢量与非局域响应可使偏振比连续发散甚至翻转为负，彻底解除偏振比与二向色性的固有束缚，实现 $0.02^\circ \text{ Hz}^{-1/2}$ 的偏振角分辨。

对称性破缺同样赋能光场调控。研究发现，超构光栅的非对称介电环境会诱发反常衍射^[121]，截断衍射通道竞争，实现高效的偏振分离与 91.5% 的单向耦合。此外，在 TiO_2 光子晶体柱的电场节点引入超构凹槽，可利用准 BIC 对局部微扰的容忍度释放空间自由度，由此提出的“部分非局域超构表面”^[122] 填补了局域超构表面与非局域光子晶体之间的设计空白。

4.2.2 器件层:无滤波器的片上多维光电探测器

围绕在单一芯片上直接读出光场多维信息的目标,近年来中红外波段相继出现了自旋光专一探测、全斯托克斯单像素量化与光电传输协同优化3类进展。

针对片上圆偏振光(CPL)探测的瓶颈,有研究以矢量光电流为信息载体^[123]。利用单一对称轴的等离激元天线,使横向光电流在左右旋光切换时精确反号,从而获得极高的理论鉴别率。实验将T型天线阵列置于石墨烯上,将近场手性转化为定向热电流,并通过特定空间排布实现对非CPL分量的完全免疫。优化后零偏压室温响应度达 392 V W^{-1} ,椭圆率探测极限低至 $0.03^\circ \text{ Hz}^{-1/2}$ 。

为将专一性推广至四维偏振空间,后续研究提出响应矩阵对角化范式^[116]。通过近场分布调控与结构对称性设计消除非对角元素,将4个子探测器映射为 4×4 响应矩阵的独立行,使每路光电压与一个斯托克斯参量一一对应,无需算法反演。器件条件数达1.69,优于间接探测的理论极限。该超级像素单次采集即可同步输出S0~S3四路独立信号,并在成像中完整还原了场景的四维偏振分布。

针对二维材料探测器高增益与高速度难以兼得的瓶颈,有研究在 $\text{WSe}_2/\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ 异质结中提出光控辅助隧穿机制^[124]。光生电子在界面积聚等效于负栅极,收窄隧穿势垒,配合界面浅能级陷阱,使响应度($7.3 \times 10^3 \text{ A W}^{-1}$)与带宽(195 kHz)同步提升。此外, Ta_2NiSe_5 的面内各向异性赋予器件偏振与波长辨识能力,并将工作波段拓展至2 200 nm。

4.2.3 应用层:从单一感知到多维光场与物质重构

应用层关注光电探测能否从单一维度(如偏振)推广至光场的角度、相位、光谱,乃至物质参量。其数学内核在于:构造互不简并的响应通道使系统响应矩阵满秩,多维信息即可由有限次电学读出解算。近年进展主要沿两条路径展开。

第一条路径将响应矩阵推向“强度-角度-偏振”混合空间^[118]。有研究利用非厄米硅纳米结构中对角度与偏振敏感的近场干涉效应,使“光学活跃”与“电学活跃”在空间上解耦。所得四维光电流构成满秩矩阵,优化后极角灵敏度达 $4 \times 10^{-5} \text{ }^\circ \text{ Hz}^{-1/2}$,有效克服了传统微透镜阵列分辨率受限与体积庞大的痛点。

第二条路径将探测对象转向被光场穿过的介质^[125]。利用硅纳米线光栅形成准BIC,结构兼具光学共振与光电转换双重职能。折射率变化引起吸收

谱异步偏移,构成可逆的二阶响应矩阵。求解该矩阵可实现免标定的折射率测量,检测极限低至 $1 \times 10^{-8} \text{ RIU Hz}^{-1/2}$,且兼容标准CMOS工艺。

置于更广的图景中,多维光电探测正沿光强、空间、时间、偏振、相位角与光谱六维同步演进^[126]。二维材料因其独特物理性质成为核心平台,实现了拓展动态范围、传感器内计算、事件驱动探测及微型光谱仪等前沿功能。当前真正的挑战在于多维融合:二维混合已有实现,而最新工作已能借助黑磷同质结与深度神经网络,同时解耦强度、光谱与全斯托克斯偏振的三维信息。

5 结束语

本文以微波光子与光电融合技术为主线,梳理了这一领域从系统应用到材料本征的发展脉络。综观全文所述的3个层面,其间存在一条清晰的递进主线:光电结合的实现方式,正由分立器件间的物理互连,逐步转向同一材料体系内部的功能承载^[7]。系统层面确立了光电协同的可行性,芯片层面提供了对这种协同进行精确表征与工程化的手段,材料层面则进一步探索不依赖器件互连、由材料本征特性直接实现光电功能的途径^[127-128]。三者构成的,是一个融合程度由系统向材料逐级深化的连续过程。

沿此主线继续外推,光电融合的后续发展方向可能由“提升协同性能”转向“实现功能集成”,即在同一器件或同一材料结构中同时实现探测、调制与存算等功能。二维铁电材料、多维光场直接探测等研究已为此提供了初步依据,其意义不在于替代现有电子器件,而在于形成新的器件形态。

应当指出,该方向目前仍有若干关键问题尚未解决:带宽、集成度与标准CMOS工艺兼容性之间难以兼顾,晶圆级光电协同测试体系亦有待建立,何种材料与器件路线能够率先满足上述约束尚无定论。但可以预期,在6G、算力网络与后摩尔时代算力需求的持续牵引下,这一层面的进展将在很大程度上决定下一代信息系统的性能边界。

参考文献

- [1] Sun Chen, Wade M T, Lee Y, et al. Single-chip microprocessor that communicates directly using light[J]. *Nature*, 2015, 528(7583): 534-538.
- [2] 尹浩,黄宇红,韩林丛,等. 6G通信-感知-计算融合网络的思考[J]. *中国科学:信息科学*, 2023, 53(9): 1838-1842.

Yin Hao, Huang Yuhong, Han Lincong, et al. Thoughts on 6G integrated communication, sensing and computing

- networks[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2023, 53(9): 1838-1842. (in Chinese)
- [3] Shastri B J, Tait A N, de Lima T F, et al. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(2): 102-114.
- [4] Walden R H. Analog-to-digital converter survey and analysis[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(4): 539-550.
- [5] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [6] 恽斌峰, 胡国华, 史清, 等. 微波光子集成芯片研究进展 (特邀) [J]. *光学学报*, 2024, 44(15): 1513029.
- Yun Binfeng, Hu Guohua, Shi Shangqing, et al. Research progress in integrated microwave photonic chips (invited)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(15): 1513029. (in Chinese)
- [7] Marpaung D, Yao Jianping, Capmany J. Integrated microwave photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2): 80-90.
- [8] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [9] Wang Cheng, Zhang Mian, Chen Xi, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. *Nature*, 2018, 562(7725): 101-104.
- [10] Wu Menghao, Li Ju. Sliding ferroelectricity in 2D van der Waals materials: Related physics and future opportunities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(50): e2115703118.
- [11] Feldmann J, Youngblood N, Karpov M, et al. Parallel convolutional processing using an integrated photonic tensor core[J]. *Nature*, 2021, 589(7840): 52-58.
- [12] Vizner Stern M, Waschitz Y, Cao W, et al. Interfacial ferroelectricity by van der Waals sliding[J]. *Science*, 2021, 372(6549): 1462-1466.
- [13] Yao Jianping. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [14] Chang Lin, Liu Songtao, Bowers J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(2): 95-108.
- [15] Parriaux A, Hammani K, Millot G. Electro-optic frequency combs[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2020, 12(1): 223-287.
- [16] Wu Yilin, Zeng Zhen, Zhang Lingjie, et al. Modeling an actively mode-locked optoelectronic oscillator based on electric amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 23835-23846.
- [17] Yuan Weichen, Fu Zhenwei, Wu Yilin, et al. Time-domain convolution model for studying oscillation dynamics in an injection-locked optoelectronic oscillator [J]. *Optics Express*, 2022, 30(22): 40728-40738.
- [18] Su Yuchong, Zeng Zhen, Peng Di, et al. Injection-locked optoelectronic oscillator with high side-mode suppression ratio and low phase noise based on frequency-conversion delay matching[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108462.
- [19] Li Zhengkai, Zhang Zhiyao, Zeng Zhen, et al. Tunable dual-passband microwave photonic filter with a fixed frequency interval using phase-to-intensity modulation conversion by stimulated Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 1961-1965.
- [20] Fu Zhenwei, Zeng Zhen, Tian Huan, et al. Phase-locked dual-frequency microwave signal generation in an optoelectronic oscillator based on frequency mixing mutual injection[J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 13825-13835.
- [21] Fu Zhenwei, Zeng Zhen, Tian Huan, et al. Wide-range tunable coherent dual-frequency microwave signal generation with low spurious components in optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(21): 7443-7450.
- [22] Zhang Lingjie, Tian Xiangrui, Zeng Zhen, et al. Costas-coded linear frequency modulation waveform generation based on a VCO-controlled Fourier domain mode locking optoelectronic oscillator[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 40274-40285.
- [23] Zeng Zhen, Zhang Lingjie, Zhang Yaowen, et al. Frequency-definable linearly chirped microwave waveform generation by a Fourier domain mode locking optoelectronic oscillator based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13861-13870.
- [24] Zhang Lingjie, Wu Yilin, Tian Huan, et al. Mode locking mechanism in Fourier-domain mode-locked optoelectronic oscillators[J]. *Optics Express*, 2024, 32(22): 40074-40091.
- [25] Zeng Zhen, Zhang Lingjie, Zhang Yaowen, et al. Microwave pulse generation via employing an electric signal modulator to achieve time-domain mode locking in an optoelectronic oscillator[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 2107-2110.
- [26] Fu Zhenwei, Ma Yangxue, Zeng Zhen, et al. Microwave local oscillator signal generation with low near-carrier phase noise based on cascaded optoelectronic oscillators[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111628.
- [27] Zeng Zhen, Zhang Lingjie, Wu Yilin, et al. Multi-format microwave signal generation based on an optoelectronic oscillator[J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30834-30843.
- [28] Zeng Zhen, Liu Yixuan, Xu Ziwei, et al. Position-definable coherent microwave pulse train generation in an actively mode-locked optoelectronic oscillator[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(3): 718-721.
- [29] Zeng Zhen, Xu Tian, Liu Yixuan, et al. Controllable microwave pulse generation in actively mode-locked optoelectronic oscillator based on electro-optic dual-drive Mach-Zehnder modulator[J]. *Optics Express*, 2025, 33(4): 8761-8773.
- [30] Xu Ziwei, Tian Huan, Zhang Lingjie, et al. High-resolution radar ranging based on the ultra-wideband chaotic optoelectronic oscillator[J]. *Optics Express*, 2023, 31(14): 22594-22602.
- [31] Tian Huan, Zhang Lingjie, Zeng Zhen, et al. Neuromorphic regenerative memory optoelectronic

- oscillator[J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 27529-27542.
- [32] Su Li, Tian Huan, Xu Ziwei, et al. Controllable non-uniformly distributed spiking cluster generation in broadband optoelectronic oscillator[J]. *Optics Express*, 2024, 32(9): 15573-15585.
- [33] Zhang Yaowen, Zeng Zhen, Zhang Lingjie, et al. Ultrafast and high-precision time delay measurement based on complementary frequency-swept light and frequency-shifted dechirping[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(6): 1927-1933.
- [34] Tang Zhenglin, Zhang Yaowen, Chen Shengkun, et al. High-precision and large-scale phase-based laser ranging with high receiving sensitivity via multi-tone modulation and frequency-shift-based coherent low-frequency detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(10): 4703-4711.
- [35] Tang Zhenglin, Zhang Yaowen, Liu Xiaoyu, et al. Periodic-error-free coherent phase-based laser ranging over a large unambiguous range: Harnessing Vernier effect and IMD3 suppression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2026, 44(8): 3041-3049.
- [36] Chen Ping, Chen Shengkun, Zhang Lingjie, et al. Suppression of phase noise deterioration induced by stimulated Brillouin scattering in high-power RoF links via phase modulation[C]//Proceedings of SPIE 13541, Second International Academic Conference on Optics and Photonics. Haikou: SPIE, 2025: 135410C.
- [37] Chen Shengkun, Zhang Yaowen, Zou Xinhai, et al. Suppression of Brillouin scattering-induced noise in long-haul high-power RoF links via non-uniformly distributed four-tone phase modulation[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(21): 6109-6112.
- [38] Chen Shengkun, Zhang Yaowen, Zhang Zhiyao, et al. High-power RoF link based on Fabry-Perot laser diode and phase modulation supporting remote photodiode-drive antenna in next-generation broadband wireless communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(14): 6690-6698.
- [39] Chen Shengkun, Zhang Yaowen, Fu Zhenwei, et al. Co-transmission of optically-carried 5G NR signal and over 14-W power light via standard single-mode fiber[J]. *Optics Communications*, 2025, 575: 131306.
- [40] Mahjoubfar A, Churkin D V, Barland S, et al. Time stretch and its applications[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 341-351.
- [41] Peng Di, Zhang Zhiyao, Zeng Zhen, et al. Single-shot photonic time-stretch digitizer using a dissipative soliton-based passively mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6519-6531.
- [42] Khilo A, Spector S J, Grein M E, et al. Photonic ADC: Overcoming the bottleneck of electronic jitter[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4454-4469.
- [43] Chen Junji, Ma Yangxue, Zhang Xuyan, et al. Inter-channel mismatch correction for photonic time-wavelength-interleaved sampling-based analog-to-digital conversion[J]. *Optics Communications*, 2026, 618: 133472.
- [44] Ma Yangxue, Liang Dong, Peng Di, et al. Broadband high-resolution microwave frequency measurement based on low-speed photonic analog-to-digital converters[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2355-2368.
- [45] Zhang Xinyan, Peng Di, Ma Yangxue, et al. Broadband high-resolution microwave frequency measurement based on photonic under sampling via using three cavity-less optical pulse sources with coprime repetition rates[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(27): 8056-8065.
- [46] Ma Yangxue, Zhang Zhenyu, Zhang Shangjian, et al. Self-calibrating microwave characterization of broadband Mach-Zehnder electro-optic modulator employing low-speed photonic down-conversion sampling and low-frequency detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 37(11): 2668-2674.
- [47] Zou Xinhai, Zhang Shangjian, Wang Heng, et al. Stepwise frequency-shifted optical heterodyne for flexible and ultrawide frequency microwave down-conversion[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(7): 3557-3563.
- [48] Zou Xinhai, Zhang Shangjian, Qi Lin, et al. Flexible ultra-wide frequency microwave down-conversion based on re-circulating four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17782-17792.
- [49] Lyu Weiqiang, Li Zhengkai, Zhang Lingjie, et al. High-resolution real-time Fourier transform based on optical frequency comb injected frequency shifting loop[J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 41635-41644.
- [50] Wang Xiaoxi, Korzh B A, Shaw M D, et al. Full-speed testing of silicon photonic electro-optic modulators from picowatt-level scattered light[C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference 2020. San Diego: Optica Publishing Group, 2020: Th4A.7.
- [51] Hale P D, Williams D F. Calibrated measurement of optoelectronic frequency response[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, 51(4): 1422-1429.
- [52] Zhang Shangjian, Zhang Chong, Wang Heng, et al. On-wafer probing-kit for RF characterization of silicon photonic integrated transceivers[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13340-13350.
- [53] Ranno L, Gupta P, Gradkowski K, et al. Integrated photonics packaging: Challenges and opportunities[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(11): 3467-3485.
- [54] Shekhar S, Bogaerts W, Chrostowski L, et al. Roadmapping the next generation of silicon photonics[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 751.
- [55] Scarselli E F, Perilli L, Perugini L, et al. A 40 nm CMOS I/O pad design with embedded capacitive coupling receiver for non-contact wafer probe test[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2015, 62(7): 1737-1746.
- [56] 曹立强, 侯峰泽, 王启东, 等. 先进封装技术的发展与机遇[J]. *前瞻科技*, 2022, 1(3): 101-114.
- Cao Liqiang, Hou Fengze, Wang Qidong, et al. Development and opportunity of advanced packaging technology[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022,

- 1(3): 101-114. (in Chinese)
- [57] Xu Ying, Wang Mengke, He Yutong, et al. Self-referenced electro-optic response measurement of dual-parallel Mach-Zehnder modulators employing single-tone level control and low-frequency bias swing[J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 12596-12604.
- [58] Xu Ying, Zhang Shangjian, Zou Xinhai, et al. Characterization of high-speed electro-optic phase modulators based on heterodyne carrier mapping at a fixed low-frequency[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 1656-1665.
- [59] Xu Ying, Zou Xinhai, Zhu Junfeng, et al. Scalable high-frequency measurement of photodetectors through harmonic up-conversion based on pilot-aided electro-optical stimulus[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(21): 7703-7709.
- [60] Zhu Junfeng, Jing Chao, Xu Ying, et al. Self-equalized intermodulation stimulus for measuring high-speed photodetectors up to Sub-THz frequency range[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 1013507.
- [61] Jing Chao, Zhu Junfeng, Xu Ying, et al. Ultrawideband response measurement of photodetectors up to 110 GHz with electro-optical subharmonic upconverter[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(10): 7632-7639.
- [62] Lei Di, Wu Yinfeng, Zhu Junfeng, et al. Scalable harmonic analysis for frequency response characterization of photodetectors with dual-wavelength modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2026, 44(13): 5597-5605.
- [63] He Yutong, Xu Ying, Zou Xinhai, et al. High-frequency characterization of electro-optic modulation chips based on photonic down-conversion sampling and microwave fixture de-embedding[J]. *Optics Express*, 2022, 30(22): 40337-40346.
- [64] He Yutong, Jing Chao, Xu Ying, et al. Self-reference frequency response characterization of photodiode chips based on photonic sampling and microwave de-embedding[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2299-2309.
- [65] 邹新海, 朱峻峰, 敬超, 等. 基于光采样的光电子集成芯片片上在线测量 (特邀) [J]. *光学学报*, 2024, 44(15): 1513032.
- Zou Xinhai, Zhu Junfeng, Jing Chao, et al. On-wafer and in-line measurement of optoelectronic integrated chips based on photonic sampling (invited)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(15): 1513032. (in Chinese)
- [66] Zhu Junfeng, Zou Xinhai, Jing Chao, et al. On-wafer high-frequency measurement of Mach-Zehnder modulation chips based on fiber-free coupling and low-frequency photodetection[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2025, 73(2): 1029-1035.
- [67] Zhu Junfeng, Jing Chao, Wang Simou, et al. Fiber-free-coupled and self-pilot-based detection for on-chip measurement of Mach-Zehnder modulators up to 110 GHz[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2026, 74(1): 975-983.
- [68] Lei Di, Xu Ying, Zou Xinhai, et al. Characterizing third-order intermodulation distortion of photodetectors based on de-coupling and de-embedding modulation distortion of modulators[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(19): 5439-5442.
- [69] Lei Di, Xu Ying, Zou Xinhai, et al. Single-carrier single-drive two-tone optical stimulus generated by self-heterodyne interferometry for analyzing third-order intermodulation distortion (IMD3) of photodiodes[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(16): 5113-5116.
- [70] 张尚剑, 雷迪, 徐映, 等. 基于导频调制的光电探测器动态频率响应特性测试 (特邀) [J]. *光学学报 (网络版)*, 2025, 2(17): 1702001.
- Zhang Shangjian, Lei Di, Xu Ying, et al. Dynamic frequency response characterization of photodetectors based on pilot-tone modulation (invited)[J]. *Acta Optica Sinica (Online)*, 2025, 2(17): 1702001. (in Chinese)
- [71] Dunsmore J, Chen Xin, Zhang Yongxun. A novel method to accurately set incident power to DUT with VNA[C]//Proceedings of the 78th ARFTG Microwave Measurement Conference. Tempe: IEEE, 2011: 1-6.
- [72] Liu Yihan, Tang Weiyi, Zeng Jinhua, et al. Ferroelectric-based neuromorphic memory devices for bio-inspired computing[J]. *Nature Reviews Electrical Engineering*, 2025, 2(11): 773-787.
- [73] Wang Chuanshou, You Lu, Cobden D, et al. Towards two-dimensional van der Waals ferroelectrics[J]. *Nature Materials*, 2023, 22(5): 542-552.
- [74] Zhang Qing, Fan Aiqing, Wang Yongshuai, et al. Emerging frontiers in two-dimensional sliding ferroelectrics [J]. *npj 2D Materials and Applications*, 2025, 9(1): 76.
- [75] Wang Xirui, Yasuda K, Zhang Yang, et al. Interfacial ferroelectricity in rhombohedral-stacked bilayer transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17(4): 367-371.
- [76] Yasuda K, Wang Xirui, Watanabe K, et al. Stacking-engineered ferroelectricity in bilayer boron nitride[J]. *Science*, 2021, 372(6549): 1458-1462.
- [77] Bian Renji, He Ri, Pan Er, et al. Developing fatigue-resistant ferroelectrics using interlayer sliding switching [J]. *Science*, 2024, 385(6704): 57-62.
- [78] Meng Peng, Wu Yaze, Bian Renji, et al. Sliding induced multiple polarization states in two-dimensional ferroelectrics [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7696.
- [79] Pan Er, Li Zefen, Yang Fan, et al. Observation and manipulation of two-dimensional topological polar texture confined in moiré interface[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 3026.
- [80] Han Wei, Zheng Xiaodong, Yang Ke, et al. Phase-controllable large-area two-dimensional In_2Se_3 and ferroelectric heterophase junction[J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18(1): 55-63.
- [81] Sui Fengrui, Yu Yilun, Chen Ju, et al. Unconventional (anti)ferroelectricity in van der Waals group-IV monochalcogenides[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 1810.
- [82] Jiang Xingan, Zhang Xiangping, Deng Zunyi, et al. Dual-role ion dynamics in ferroionic CuInP_2S_6 : Revealing the

- transition from ferroelectric to ionic switching mechanisms[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 10822.
- [83] Wu Guangjian, Zhang Xumeng, Feng Guangdi, et al. Ferroelectric-defined reconfigurable homojunctions for in-memory sensing and computing[J]. *Nature Materials*, 2023, 22(12): 1499-1506.
- [84] Liang Lei, Pan Er, Cao Guiming, et al. Configurable kinetics of polarization switching via ion migration in ferroionic CuInP_2S_6 [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 4462.
- [85] Chen Jiangang, Wen Zhixing, Yang Fan, et al. Refreshable memristor via dynamic allocation of ferro-ionic phase for neural reuse[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 702.
- [86] Wu Shuaiqin, Deng Jie, Wang Xudong, et al. Polarization photodetectors with configurable polarity transition enabled by programmable ferroelectric-doping patterns[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 8743.
- [87] Li Yue, Fu Jun, Mao Xiaoyu, et al. Enhanced bulk photovoltaic effect in two-dimensional ferroelectric CuInP_2S_6 [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5896.
- [88] Liu Keqin, Zhang Teng, Dang Bingjie, et al. An optoelectronic synapse based on $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ with controllable temporal dynamics for multimode and multiscale reservoir computing[J]. *Nature Electronics*, 2022, 5(11): 761-773.
- [89] Yang Dongyang, Liang Jing, Wu Jingda, et al. Non-volatile electrical polarization switching via domain wall release in 3R-MoS_2 bilayer[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1389.
- [90] Fan Aiqing, Zhang Qing, Yang Zihao, et al. Tailored sliding ferroelectricity for ultrahigh fatigue resistance in stacked trilayer MoS_2 crystals[J]. *Science Advances*, 2025, 11(31): eadx8192.
- [91] Li Xiuzhen, Qin Biao, Wang Yaxian, et al. Sliding ferroelectric memories and synapses based on rhombohedral-stacked bilayer MoS_2 [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 10921.
- [92] Zhu Jiadi, Park J H, Vitale S A, et al. Low-thermal-budget synthesis of monolayer molybdenum disulfide for silicon back-end-of-line integration on a 200 mm platform[J]. *Nature Nanotechnology*, 2023, 18(5): 456-463.
- [93] Yasuda K, Zaly-Geller E, Wang Xirui, et al. Ultrafast high-endurance memory based on sliding ferroelectrics[J]. *Science*, 2024, 385(6704): 53-56.
- [94] Wang Li, Qi Jiajie, Wei Wenya, et al. Bevel-edge epitaxy of ferroelectric rhombohedral boron nitride single crystal[J]. *Nature*, 2024, 629(8010): 74-79.
- [95] Jiang Yuxuan, Ning Xingkun, Liu Renhui, et al. 2D ferroelectric narrow-bandgap semiconductor Wurtzite' type $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ and its silicon-compatible growth[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 7364.
- [96] Park S, Lee D, Kang J, et al. Laterally gated ferroelectric field effect transistor (LG-FeFET) using $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$ for stacked in-memory computing array[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6778.
- [97] Wang Shuiyuan, Liu Lan, Gan Lurong, et al. Two-dimensional ferroelectric channel transistors integrating ultra-fast memory and neural computing[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 53.
- [98] Muller J, Boscke T S, Schroder U, et al. Nanosecond polarization switching and long retention in a novel MFIS-FET based on ferroelectric HfO_2 [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2012, 33(2): 185-187.
- [99] Fei Zaiyao, Zhao Wenjin, Palomaki T A, et al. Ferroelectric switching of a two-dimensional metal[J]. *Nature*, 2018, 560(7718): 336-339.
- [100] Jindal A, Saha A, Li Zizhong, et al. Coupled ferroelectricity and superconductivity in bilayer Ta-MoTe_2 [J]. *Nature*, 2023, 613(7942): 48-52.
- [101] Huang Feiting, Joon Lim S, Singh S, et al. Polar and phase domain walls with conducting interfacial states in a Weyl semimetal MoTe_2 [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4211.
- [102] Yuan Shuoguo, Luo Xin, Chan H L, et al. Room-temperature ferroelectricity in MoTe_2 down to the atomic monolayer limit[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1775.
- [103] Xu Bo, Deng Junkai, Ding Xiangdong, et al. Van der Waals force-induced intralayer ferroelectric-to-antiferroelectric transition via interlayer sliding in bilayer group-IV monochalcogenides[J]. *npj Computational Materials*, 2022, 8(1): 47.
- [104] Zhou Ziwen, Wang Shun, Zhou Zhou, et al. Unconventional polarization fatigue in van der Waals layered ferroelectric ionic conductor CuInP_2S_6 [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 8254.
- [105] Yao Xiaodong, Bai Yinxin, Jin Cheng, et al. Anomalous polarization enhancement in a van der Waals ferroelectric material under pressure[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4301.
- [106] Soliman T, Chatterjee S, Laleni N, et al. First demonstration of in-memory computing crossbar using multi-level cell FeFET[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6348.
- [107] Luo Zhen, Wang Zijian, Guan Zeyu, et al. High-precision and linear weight updates by subnanosecond pulses in ferroelectric tunnel junction for neuro-inspired computing[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 699.
- [108] Choi Y, Jeong S, Jeong H, et al. Advanced AI computing enabled by 2D material-based neuromorphic devices[J]. *npj Unconventional Computing*, 2025, 2(1): 8.
- [109] Fan Yandong, Huang Weian, Zhu Fei, et al. Dispersion-assisted high-dimensional photodetector[J]. *Nature*, 2024, 630(8015): 77-83.
- [110] 孙思蔚, 魏静轩, 刘永. 光学波前传感技术研究进展[J]. *电子科技大学学报*, 2024, 53(5): 672-684.
Sun Siwei, Wei Jingxuan, Liu Yong. Recent advances in optical wavefront sensing technology[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2024, 53(5): 672-684. (in Chinese)
- [111] Deng Jie, Shi Mengdie, Liu Xingsi, et al. An on-chip full-Stokes polarimeter based on optoelectronic polarization eigenvectors[J]. *Nature Electronics*, 2024, 7(11): 1004-1014.

- [112] Dai Mingjin, Wang Chongwu, Qiang Bo, et al. On-chip mid-infrared photothermoelectric detectors for full-Stokes detection[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4560.
- [113] Bao Jie, Bawendi M G. A colloidal quantum dot spectrometer[J]. *Nature*, 2015, 523(7558): 67-70.
- [114] Yang Zongyin, Albrow-Owen T, Cui Hanxiao, et al. Single-nanowire spectrometers[J]. *Science*, 2019, 365(6457): 1017-1020.
- [115] Yoon H H, Fernandez H A, Nigmatulin F, et al. Miniaturized spectrometers with a tunable van der Waals junction[J]. *Science*, 2022, 378(6617): 296-299.
- [116] Liu Xingsi, Chen Yinzhu, Kong Xianghong, et al. Metaphotonic photodetectors for direct Stokes quantification[J]. *Nature Electronics*, 2025, 8(11): 1099-1107.
- [117] Wei Jingxuan, Li Ying, Wang Lin, et al. Zero-bias mid-infrared graphene photodetectors with bulk photoresponse and calibration-free polarization detection[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 6404.
- [118] Liang Wenjiang, Cao Zhijie, Sun Siwei, et al. Filterless vector light field photodetector based on photonic-electronic co-designed non-Hermitian silicon nanostructures [J]. *Optics Express*, 2025, 33(2): 2395-2405.
- [119] Sun Siwei, Wei Jingxuan, Wang Junyong, et al. Polarization-sensitive photoelectric conversion[J]. *Chemical Reviews*, 2026, 126(2): 1470-1533.
- [120] Wei Jingxuan, Xu Cheng, Dong Bowei, et al. Mid-infrared semimetal polarization detectors with configurable polarity transition[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(8): 614-621.
- [121] Zou Tao, Xiang Junbiao, Ma Xuezhi, et al. Anomalous diffraction of metagratings near dielectric interfaces[J]. *Journal of Optics*, 2026, 28(3): 035603.
- [122] Wei Jingxuan, Liu Yong. Bridging the gap in flat optics: The dawn of partially nonlocal metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 314.
- [123] Wei Jingxuan, Chen Yang, Li Ying, et al. Geometric filterless photodetectors for mid-infrared spin light[J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(2): 171-178.
- [124] Liu Mingxiu, Wei Jingxuan, Qi Liujian, et al. Photogating-assisted tunneling boosts the responsivity and speed of heterogeneous WSe₂/Ta₂NiSe₅ photodetectors [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 141.
- [125] Wei Hongying, Zhao Chen, Zou Tao, et al. Semiconductive optoelectronic refractive index sensors with on-chip electrical readout[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(16): 4930-4933.
- [126] Han Jiayue, Fu Ziyi, Wei Jingxuan, et al. 2D materials-based next-generation multidimensional photodetectors [J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 362.
- [127] Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip[J]. *Nature*, 2018, 556(7701): 349-354.
- [128] 马文壮, 游可唯, 张胤, 等. 基于深度学习的微纳结构光谱设计研究进展[J]. *电子科技大学学报*, 2024, 53(5): 641-654.
- Ma Wenzhuang, You Kewei, Zhang Yin, et al. Research progress on deep learning-based spectral design of micro-nano structures[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2024, 53(5): 641-654. (in Chinese)

责任编辑 张 莉