
硅光现场可编程门阵列赋能智算集群

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41797.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

硅光现场可编程门阵列赋能智算集群。 导读

人工智能模型不断变大，智算集群正在同时面对计算、存储、互连和能耗等多重压力。硅光技术凭借高速、低时延、大带宽和工艺兼容等优势，已成为突破这些瓶颈的重要方向。但在实际系统中，许多硅光芯片仍像专用工具：一颗芯片服务一种任务，功能改变往往意味着重新设计、流片、封装和测试。

近日，国家信息光电子创新中心、光通信技术和网络全国重点实验室、鹏城实验室联合研发出硅光可编程处理系统LightIN。该系统将 40 个可编程单元和 160 余个光子器件集成在同一硅光芯片上，并配合自主开发的测试、编译与调节智能配置框架，使一颗芯片能够在光计算、光信号处理、光交换和光安全加密等场景之间切换。相关成果以 LightIN: a versatile silicon-integrated photonic field programmable gate array with an intelligent configuration framework for next-generation AI clusters 为题发表于Light: Science Applications。

一、从专用芯片到可编程平台

当前AI集群的性能不只取决于单个计算芯片。模型训练和推理需要在大量加速器、存储器和网络节点之间搬运数据，系统中的互连带宽、通信时延、调度效率和能耗都会影响整体算力释放。传统电子互连在高速率和大规模场景下面临功耗上升、信号损耗和延迟增加等问题，推动人们寻找新的光电融合架构。

硅光芯片已经在数据中心光互连中得到应用，也在光计算、光交换和片上信号处理等方向展现潜力。不过，应用专用光子集成芯片通常面向固定功能设计。它们可以在单一任务上表现出色，却难以适应AI集群中不断变化的任务类型、网络拓扑和资源调度需求。

因此，一个关键问题浮现出来：能否像电子FPGA一样，让硅光芯片也具备可重构、可编译和可重复配置的能力？如果答案是肯定的，光子芯片就不再只是完成某一类计算或传输任务的器件，而有机会成为面向智算集群的通用光学硬件平台。

二、让光路可编程，也要让系统会配置

光子现场可编程门阵列的核心思路，是用可调光学单元组成网格，通过改变每个单元的状态来重构光路。难点在于，真实芯片并不等同于理想模型。制造误差、热串扰、环境扰动和器件非一致性都会让同一组控制电压对应不同的光学响应。

更进一步，面向智算集群的硅光芯片不能只在实验中调通一次。它需要形成可复用的配置流程：先认识芯片本身，再把任务编译成光路，最后根据物理输出继续校准。也就是说，硬件可重构只是第一步，真正走向系统应用还需要软硬件协同。

三、LightIN 的硬件网格与智能配置框架

围绕上述挑战，研究团队提出了LightIN 硅基集成光子现场可编程门阵列系统。该芯片采用SOI工艺制造，内部为 4×4 方形循环网格拓扑。网格中的可编程单元可被配置为不同相位状态，从而把同一片硬件重构成计算、滤波、锁定、交换或加密所需的光路。

LightIN的另一项关键创新是TCA智能配置框架，即测试、编译与调节三阶段流程。测试阶段建立器件状态与控制电压之间的对应关系；编译阶段把目标任务转化为具体光路拓扑和初始电压；调节阶段利用数值模型与物理芯片输出之间的偏差，对电压进行在线修正。这样，即使芯片内部没有额外集成监测光电探测器，系统仍能完成可靠配置。

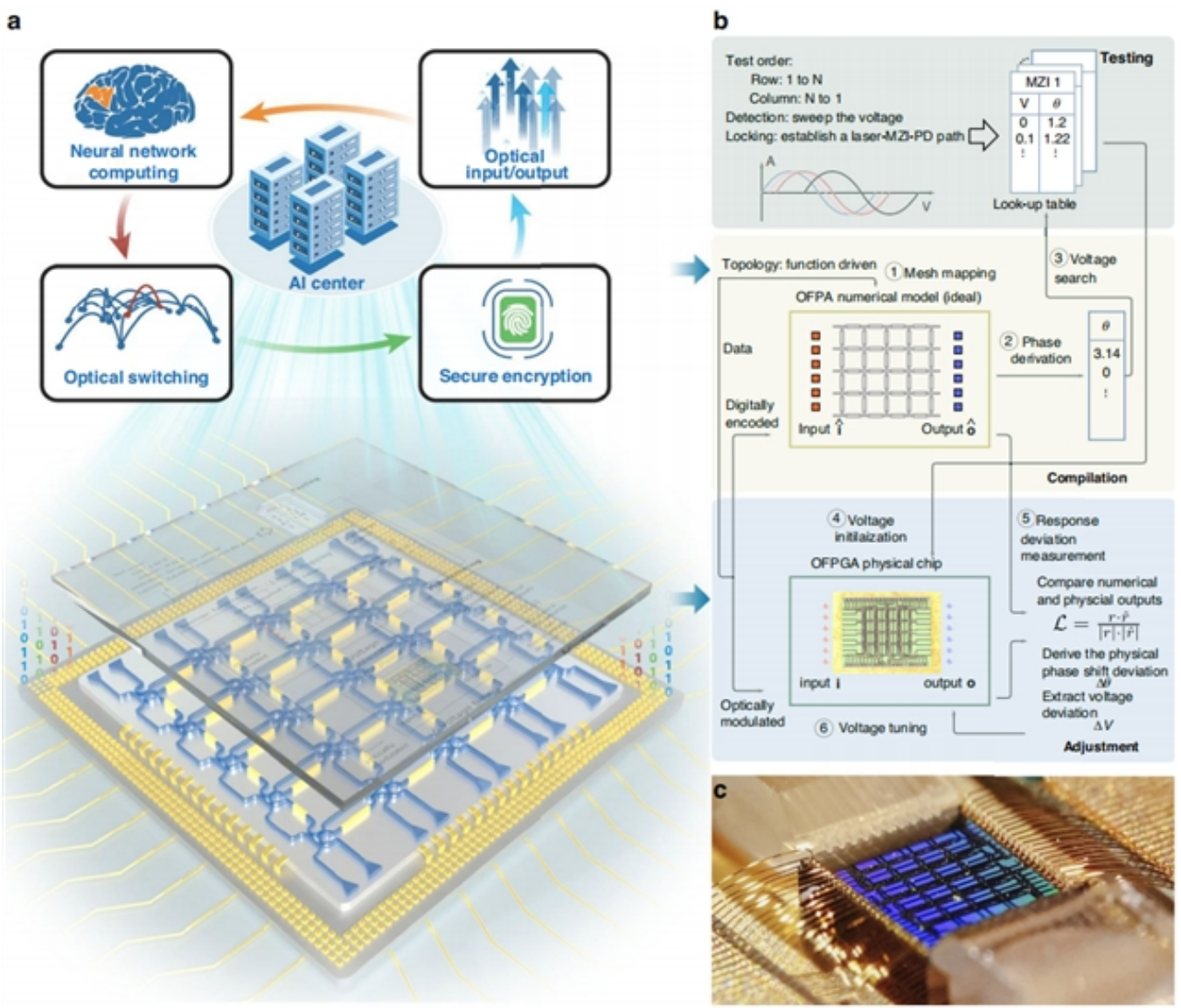


图1：LightIN

硅光可编程处理系统及其在智算集群中的应用。该系统由硅光可编程芯片、电子控制模块和 TCA 智能配置框架组成，可面向光计算、光输入输出、光交换和安全加密等任务进行重构

亮点一：以光速完成图像处理

矩阵乘法是神经网络计算中的基础操作。团队首先将 LightIN 配置为矩阵运算光路，在同一芯片上实现了 4×4 双向酉矩阵乘法和 3×3 非酉矩阵乘法。实验结果表明，该系统可实现超过 1.92 TOPS 的计算速度，并达到 6.22-bit 计算分辨率。

在神经网络推理验证中，研究团队将训练得到的相位参数写入芯片，并在 Iris 数据集分类任务上实现了 93.33% 的在线推理准确率。由于光信号在片上直接完成传播和干涉计算，单次推理总延迟低于 260 ps，展示了可编程硅光网格用于高速光计算的潜力。

图2：LightIN用于光计算的实验系统和结果。通过改变网格拓扑，芯片可完成双向酉矩阵、非酉

矩阵和神经网络推理等不同计算任务

亮点二：为光IO提供自动锁定能力

在高速光互连中，微环调制器具有紧凑、低功耗等优势，但其工作波长容易受到温度和工艺波动影响，需要精确锁定。团队将LightIN配置为片上光学微分器，用来提取与调制信号质量相关的反馈信号，从而自动调节微环调制器工作点。

实验显示，该方法可支持5至32 Gb/s非归零调制信号的自动波长锁定，并在不同温度条件下保持稳定眼图质量。这说明LightIN不只是计算芯片，也能作为面向光输入输出链路的可编程信号处理单元。

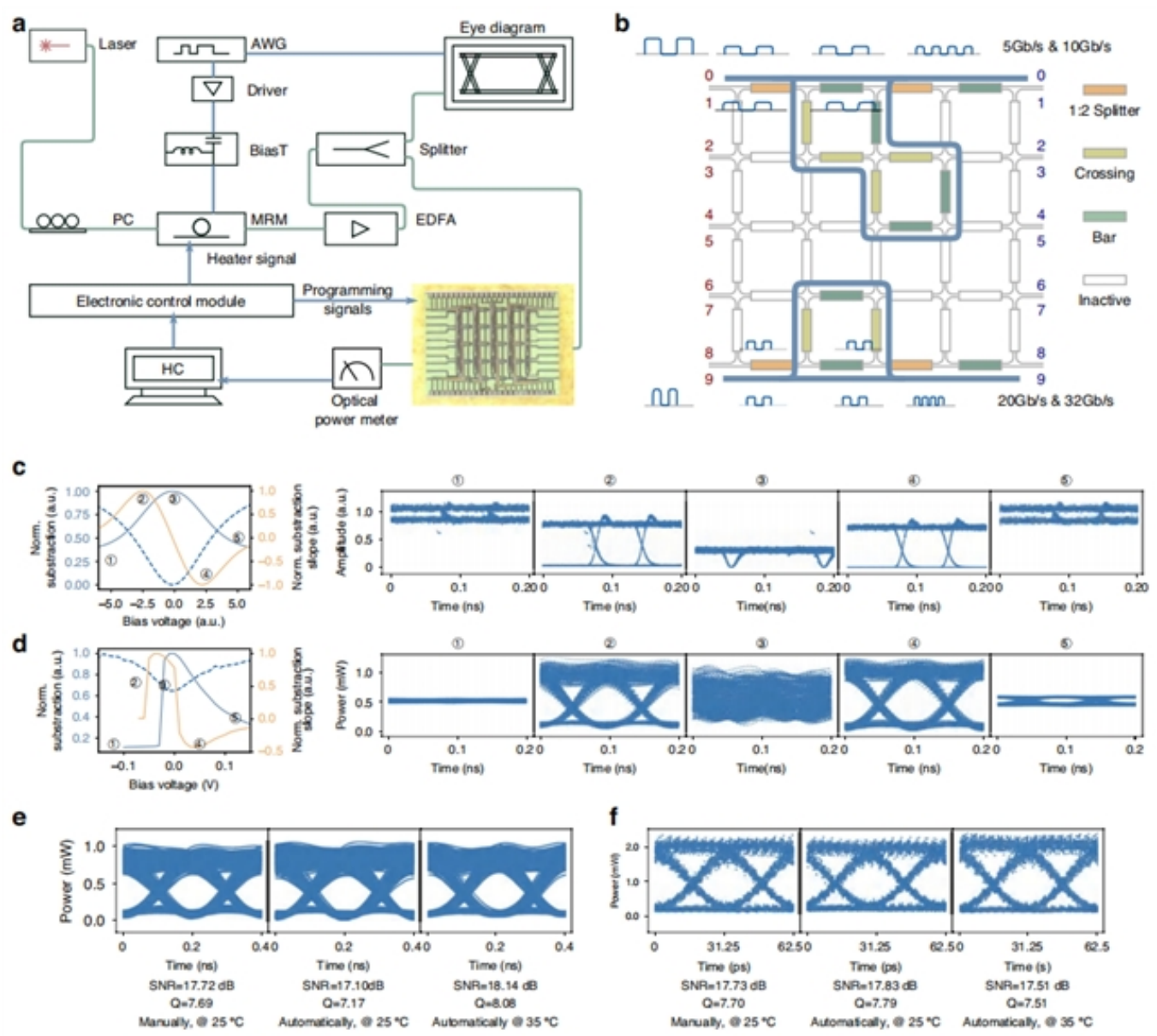


图3：LightIN用于微环调制器自动波长锁定。芯片被配置为光学微分器后，可提取监测信号并反馈调节微环调制器工作状态

亮点三：把光互连变成可调度资源

面向大规模智算集群，光交换有望减少数据在电子域和光域之间反复转换带来的开销。研究团队在LightIN上实现了 4×4 光通道交换功能。通过把网格中的部分可编程单元设置为交叉或直通状态，系统可以在不同输入端口和输出端口之间建立可重构连接。

测试结果显示，LightIN在中心波长附近的端口间串扰最低可达到约-44 dB，并能在较宽波长范围内保持较低串扰。这一结果验证了其作为片上可编程光交换单元，用于高速互连和资源动态调度的可行性。

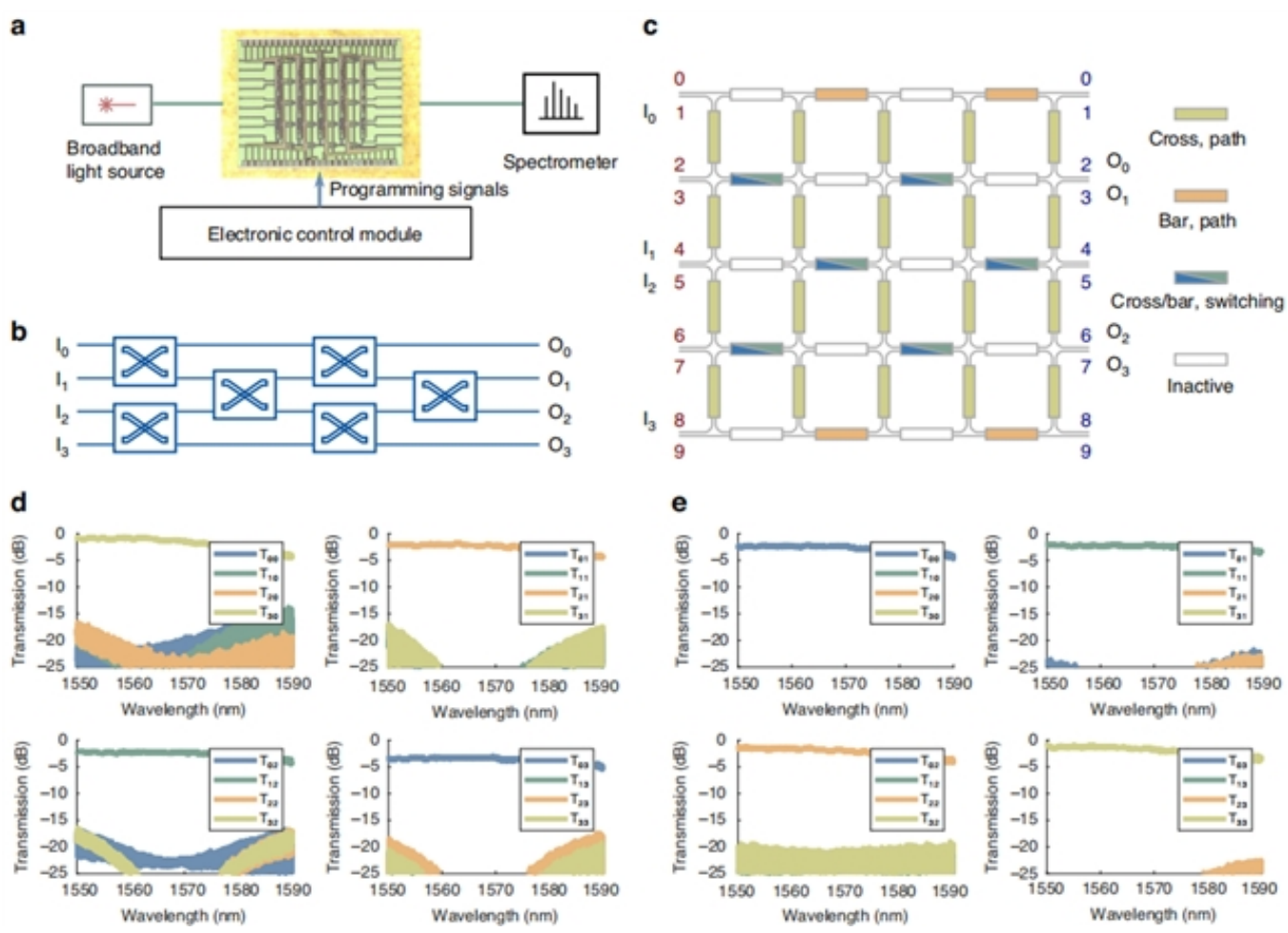


图4：LightIN用于 4×4 光交换。通过编程不同可调单元的状态，芯片可在多个输入输出端口之间建立可重构光路

亮点四：利用制造差异生成光域硬件指纹

随着算力基础设施日益复杂，硬件身份认证和密钥生成也成为系统安全的重要组成部分。LightIN中的光学路径会受到制造过程中微小随机差异的影响，这些差异难以复制，却可以被稳定读出。研究团队利用这一特点，在芯片上实现了硅基光子物理不可克隆功能。

实验结果显示，同一芯片内部的响应具有较好重复性，不同芯片之间则表现出明显差异，可用于生成独特的硬件指纹。这为未来光电融合系统中的密钥生成、设备认证和光域安全提供了新的技

术路径。

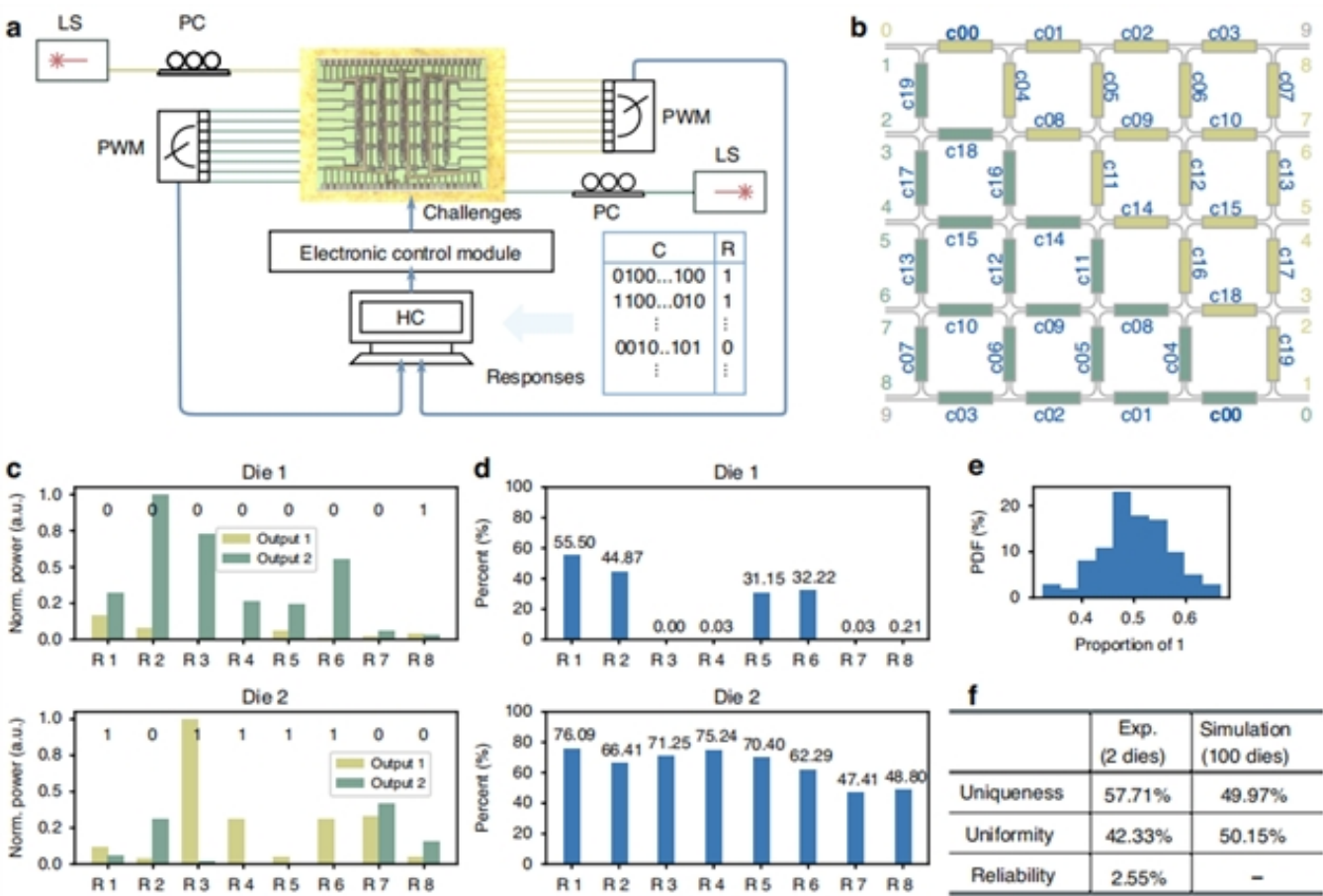


图5：LightIN用于光子物理不可克隆功能。制造误差引入的随机光学响应可被用于生成芯片级硬件指纹

四、总结与展望：面向光电融合智算集群的新范式

这项研究的意义不只在展示了某一项单点功能，而在于证明了同一硅光硬件可以通过编程服务于多类任务。LightIN将可重构光子网格、电子控制模块和智能配置框架结合起来，为硅光芯片从应用专用器件走向可编程系统平台提供了实验基础。

面向未来，研究团队认为，器件损耗、热调控效率、封装形态、电子控制集成和自动化编译算法仍有进一步优化空间。随着这些环节逐步成熟，可编程硅光芯片有望扩展到更大规模，为下一代光电融合智算集群提供更灵活、更高效的片上处理能力。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02209-5>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：余少华等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发