微波混沌驱动电光频率梳实现的可编程超宽带光子混沌平台

Shiyu Shi[1,2,4†], Yiqun Zhang[1,2†], Mengjie Zhou[3†], Mingfeng Xu[1,2,4*], Xianglei Yan[1,2], Qiang Chen[1,2,4], Yunxia Yang[1,2], Yinghui Guo[1,2,4], Mingbo Pu[1,2,4*], and XiangangLuo[1,2,4*]

[1]中国科学院光场调控科学与技术全国重点实验室，中国科学院光电技术研究所，成都 610209，中国。[2]中国科学院矢量光场研究中心，中国科学院光电技术研究所，成都 610209，中国。[3]天府兴隆湖实验室，成都 610299，中国。[4]中国科学院大学材料科学与光电技术学院，北京 100049，中国。

†这些作者对本研究的贡献相同。*电子邮箱：
xumf@ioe.ac.cn、pmb@ioe.ac.cn、lxg@ioe.ac.cn

光学混沌在安全通信、激光雷达和强化学习领域展现出巨大潜力。然而，其可扩展性长期受到带宽与并行混沌信道数量之间固有权衡的限制。在此，我们提出一种可编程的“混沌梳”架构，利用标准电光器件突破这一限制。通过将延迟反馈混沌激光与连续波参考光进行外差，产生宽带混沌微波信号，同时驱动级联电光频率梳，将混沌动力学印刻在所有梳齿上，并将其合并为超宽带混沌连续谱。随后，结合光谱切片，可灵活提取并行混沌信道，同时保持统计独立性，并实现逐信道可编程。由此，我们展示了有效带宽为 543.8 GHz 的单通道超宽带光学混沌，以及超额噪声比为 52.99 ± 2.85 dB 的宽带太赫兹噪声源，以验证其平坦度。此外，我们利用不相关并行混沌，在 256臂老虎机问题中实现超快光子决策——

制定，取得了 0.86 的良好幂律缩放指数。我们的工作为构建可编程、可重构且面向应用的光子混沌系统铺平了道路。

引言

混沌系统由于对初始条件的极端敏感性和非周期动力学而表现出内在的复杂行为，这长期以来推动了数学、物理学和工程学领域的持续研究[1,2]。特别是，光学混沌具有超快时间动力学和宽光谱带宽，相较于电子系统具备显著优势。在光学密码学中，激光诱导宽带混沌载波能够将低振幅信息隐藏于高熵波形中，从而实现物理层安全传输[3-6]。在计算科学中，蒙特卡罗模拟、随机建模和强化学习等应用依赖高质量的随机数生成，而混沌为算法和基础设施层面的运行提供了关键熵源[7-10]。对于毫米波噪声生成，具有平坦光谱特征的光学混沌被认为是实现宽带熵的领先候选方案[11,12]。近年来，并行光学混沌推动了传感领域的发展，尤其是在光探测与测距（LiDAR）系统中，可实现高精度、抗干扰测距[13-15]。至关重要的是，这些应用的有效性取决于混沌光源的质量。随着数据需求不断增长，同时扩展光谱带宽和并行通道数，对于提升信息吞吐量并支持多任务协同处理至关重要。

外腔扰动（如光学反馈或注入）仍是生成混沌激光器最成熟的方法，但其光谱带宽和平坦度最终受半导体增益介质固有弛豫振荡的限制[16,17]。非线性光谱展宽技术可将单信道混沌的带宽扩展至超过 50 GHz[18], ，但无法产生大量不相关通道。并行混沌生成已成为克服这一可扩展性瓶颈的有前景替代方案。然而，现有并行化策略存在显著局限。多模激光器通过激发多个激射模式来

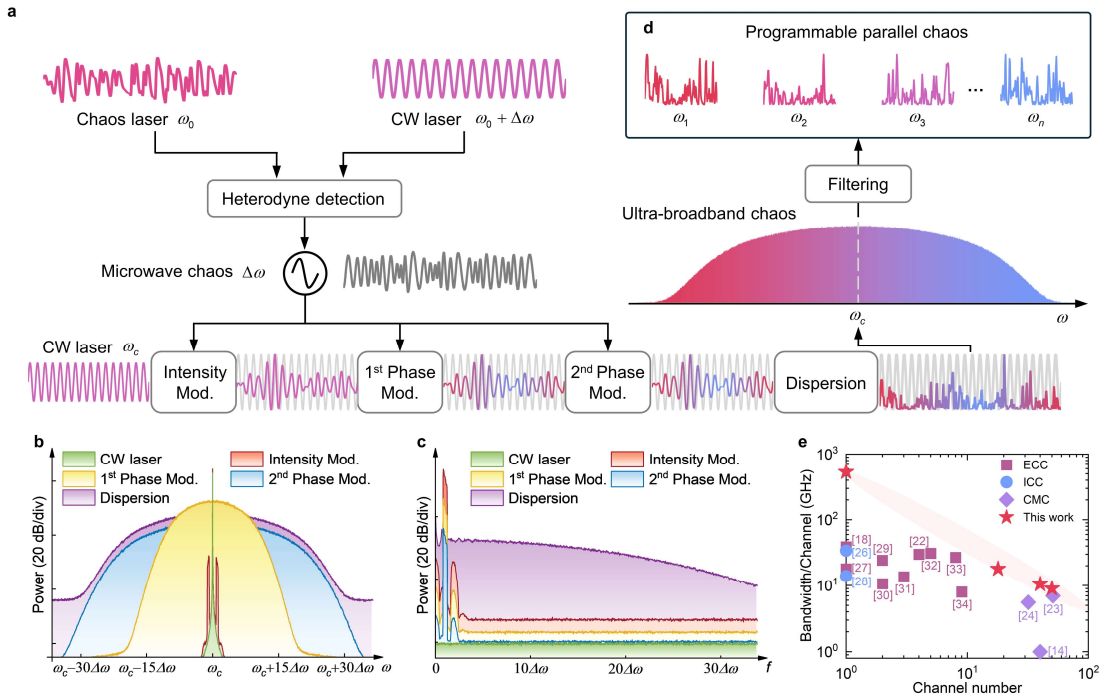
生成并行混沌信道，但会受到强烈的模间耦合与竞争影响，导致信道相关性高且可调谐性有限[19]。另一种方案是采用混沌激光器阵列或全局耦合激光器网络实现空间并行混沌生成，但其可扩展性受到较大占用空间和系统复杂性的制约，给小型化和大规模集成带来挑战[20-22]。此外，在调制不稳定区运行的基于微梳的混沌源已展示出超过 100 个信道[23-25]。然而，由于微腔的色散和非线性稳定性，其最大有效带宽通常低于 7 GHz，且其光谱特性在很大程度上由器件几何结构决定，限制了可重构性。迄今为止，尚无已报道方案能够同时实现超宽带、低相关性和高度可编程的并行混沌，并适用于可扩展、面向应用的部署。

在此，我们通过引入一种由微波混沌驱动的电光频率梳实现的新型“混沌梳”架构，克服了混沌带宽与并行性之间长期存在的权衡。通过将延迟反馈混沌激光器与连续波（CW）参考信号进行外差，生成了一个32.5 GHz的宽带微波混沌信号，并利用该信号驱动一个共用的级联电光频率梳。瞬时频率和振幅的混沌涨落被印刻到每个梳齿上，同时相位调制引起光谱展宽和重叠，将周期性频率梳转变为连续型光学混沌源。我们实现了有效带宽为543.8 GHz的单通道超宽带光学混沌，并通过光谱切片展示了对并行混沌信道进行任意、独立编程控制的能力。通过实现一个0–500 GHz、超额噪声比（ENR）为52.99 ± 2.85 dB的噪声源，我们验证了其平坦的光谱特性。此外，我们将不相关并行混沌应用于强化学习中的可扩展多臂老虎机（MAB）问题，实现了更快的决策速度和更好的可扩展性。该平台突破了传统混沌激光器的弛豫振荡极限，解决了现有系统中的带宽—并行性瓶颈，并为安全通信、人工智能光子学和传感等下一代应用提供了可重构基础。

结果

可编程超宽带光子混沌生成原理

图1a展示了所提出的用于生成可编程超宽带光子混沌的“混沌梳”架构原理。系统首先以中心频率为 ω_0的光学混沌种子信号开始，该信号与频率为$\omega_0+\Delta\omega$ 的可调谐连续波参考信号进行外差，生成中心频率为$\Delta\omega$的宽带微波混沌信号。该信号保留了原始混沌动力学，并用于同时驱动一个由一个强度调制器（IM）和两个串联相位调制器（PMs）组成的级联电光频率梳，将混沌印刻到每个梳线上，从而构成超宽带光学混沌源的基础。图1b和1c描绘了调制过程中光学频谱和射频频谱的演化。微波混沌信号首先驱动一个强度调制器（IM），将一个连续波激光器转换为初始光学频率梳，并产生以$\Delta\omega$为间隔的对称高阶边带。与单色驱动产生的离散谱线不同，宽带微波混沌输入会形成连续的随机调制频谱包络，并呈现非周期性涨落。随后，该信号经过两个级联相位调制器（PMs），每个调制器均由同一微波混沌波形驱动。第一次相位调制引入额外边带，这些边带之间的强烈频谱重叠导致整个频谱发生混叠和平滑，从而有效地使包络变平。第二级相位调制进一步增强了这种展宽，最终形成宽带连续型混沌光谱。所得信号经单模光纤（SMF）传输，在色散作用下，时变相位涨落被转换为可测量的强度动力学。这种色散映射不仅实现了直接探测，还增加了系统的动力学复杂度，从而产生高维超宽带混沌光学信号（所提出方案的详细理论模型见补充说明1）。



Fig。1 可编程超宽带光子混沌的原理与性能

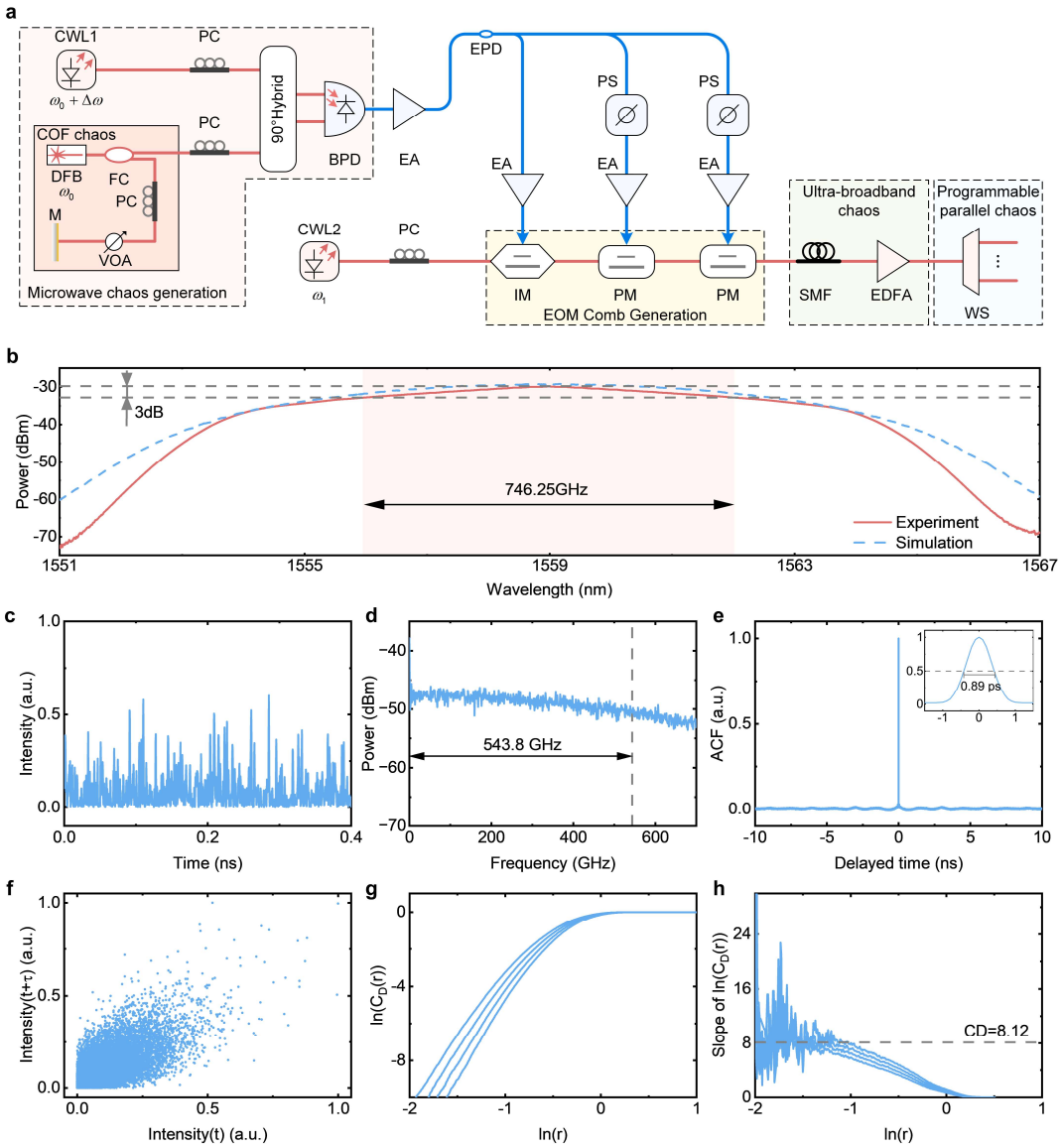
生成方案。a，所提出的“混沌梳”架构示意图。光学混沌种子（中心波长为 ω_0）与连续波参考信号（中心波长为 $\omega_0+\Delta\omega$）进行外差，生成宽带混沌微波信号（中心波长为 $\Delta\omega$），该信号同时驱动级联电光频率梳，其由一个强度调制器和两个相位调制器组成。通过色散进行相位到强度转换，从而产生超宽带光学混沌源。最后，借助可编程光滤波器实现可调多通道混沌输出。**b-c**，图**a**所示调制过程中光学（b）和射频（c）频谱的演变。**d**，通过调整滤波器中心波长和带宽实现的可重构并行混沌输出示例。**e**，从单通道带宽和并行混沌信道数量两方面比较本研究与以往方法的性能。ECC，外腔混沌；ICC，内腔混沌；CMC，混沌微梳。

生成的超宽带混沌信号通过可编程波形整形器进行动态频谱切片，从而并行生成多个低相关混沌光通道（图 1d）。通过调节中心波长和滤波器带宽等参数，系统可按需重新配置，以产生带宽由用户定义的任意多信道输出，支持灵活且针对特定应用的部署。如图 1e 所示，所提出的架构同时

在单通道带宽和并行混沌输出灵活性方面均优于现有方案。我们展示了一种超宽带光子混沌源，其有效带宽最高可达 543.8 GHz，达到当前最先进水平的十倍以上。借助频谱切片，该连续谱可实现可扩展的并行化；实验结果证实，在均匀滤波条件下，可生成 50 个独立的混沌信道，且每个信道均保持 ~9 GHz 的带宽。这种并行性能可媲美基于混沌微梳的系统，同时具有更高的带宽和可重构性（更多详情见补充说明 2）。

可编程超宽带光子混沌的特性

图 2a 展示了可编程超宽带光子混沌源的实验装置（更多详情请参阅“方法”）。我们首先对生成的超宽带混沌信号进行表征。如图 2b 所示，光谱呈现宽阔且平坦的轮廓，3 dB 带宽为 746.25 GHz，是当前最先进水平的七倍[35]。由于电子探测带宽有限，无法直接测量整个频谱。为此，我们使用 VPIphotonics 软件构建了数值仿真[36],，其系统参数与实验配置高度一致（补充表 1）。仿真光谱（图 2b 中的虚线）与实验结果高度吻合，验证了所生成光学混沌的频谱范围和谱线平坦度。图 2c 展示了生成的超宽带混沌信号的时间序列，其振幅呈现强烈的随机波动。图 2d 中对应的射频频谱显示，功率谱密度从直流电（DC）起始并保持平坦，未见明显的弛豫振荡峰。有效带宽定义为包含总信号能量 80% 的频率范围[37],，达到 543.8 GHz，较当前国际基准高出一个数量级。图 2e 展示了超宽带混沌信号的自相关函数（ACF），呈现尖锐的类 δ 形轮廓，未见明显的时延特征。ACF 的半高全宽（FWHM）为 0.89 ps，与频谱带宽相符。

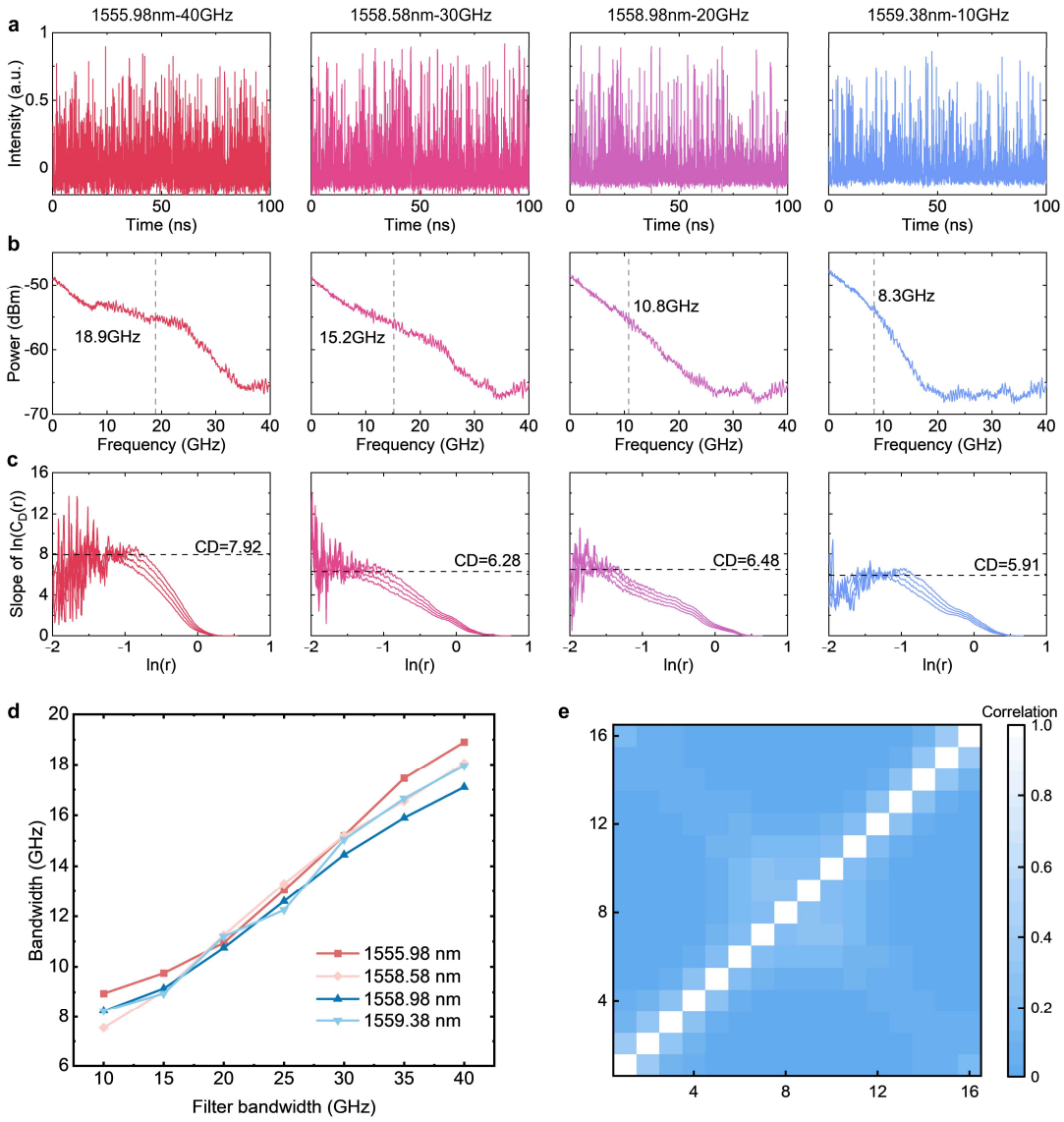


Fig。2 超宽带光学混沌信号的特性。a，实验装置 .

CWL，连续波激光器；DFB，分布反馈激光器；FC，光纤耦合器；PC，偏振控制器；VOA，可变光衰减器；M，反射镜；BPD，平衡光电探测器；EA，电放大器；EPD，电功率分配器；PS，移相器；IM，强度调制器；PM，相位调制器；SMF，单模光纤；EDFA，掺铒光纤放大器；WS，波形整形器；COF，传统光学反馈。**b**，生成的超宽带混沌信号的仿真和实验光谱。**c-f**，超宽带混沌信号的时间序列（**c**）、射频频谱（**d**）、自相关函数（**e**）和相图（**f**）的仿真结果。**g**，相关积分$C_D(r)$与半径r的关系。**h, g**中的曲线斜率收敛于关联维数 CD ≈ 8.12。**e** 中的插图为 ACF 的放大图，其半高全宽为 0.89 ps

图 2f 展示了根据时间序列重构的相图，呈现出高维混沌吸引子所特有的复杂、遍历且有界的拓扑结构。为量化动力学复杂度，我们使用Grassberger-Procaccia算法[38]计算关联维数（CD）。如图 2g 所示，在较小的r值下，关联积分$C_D(r)$ 在双对数域中随半径r 线性变化，其斜率收敛至 CD ≈ 8.12（图 2h），显著高于传统光学反馈产生的光反馈混沌[16]。有关表征方法和参数影响的更多细节，请参见补充说明 3–6。这些结果证实，“混沌梳”架构带来了增强的非线性动力学，使生成高复杂度超宽带混沌信号成为可能。

除了生成单个超宽带混沌信号外，我们的平台还可通过光谱整形器实现可编程、互不相关的并行混沌输出，并可独立调节中心波长和滤波器带宽。图 3a–e 通过四个代表性信道展示了这种可编程性。时域轨迹（图 3a）呈现出强烈的随机波动，而其射频频谱（图 3b）中未见弛豫振荡峰。关联积分斜率（图 3c）证实各信道均具有较高的动力学复杂度。图 3d 展示了四种波长下有效带宽随滤波器带宽的变化关系，结果表明，随着滤波器带宽增大，所有信道的有效带宽均同步增加。这些结果验证了我们的“混沌梳”架构能够灵活调控混沌信道，并为每个信道独立设定光谱特性（更多详情见补充说明 7）。信道间相关性是评估并行混沌信号的一项关键指标。为评估这一指标，我们生成了 16 个并行信道，其滤波器带宽为 40 GHz，信道间隔为 50 GHz（这些光信道的表征及信道间隔的影响见补充说明 8 和 9）。所得相关矩阵如图 3e 所示。虽然相邻信道和对角信道之间的相关性略高，但所有信道间相关系数均低于 0.4，满足并行运行的要求。



Fig。3 可编程并行混沌输出的特性。a-c，时间序列（**a**），射频谱（**b**）以及四个具有不同中心波长和滤波带宽的代表性混沌输出的关联积分斜率（**c**）。**d**，四种不同波长下有效带宽随滤波器带宽的变化关系。**e**，采用 40 GHz 滤波器带宽和 50 GHz 信道间隔生成的 16 个混沌信道的相关矩阵。

宽带太赫兹噪声源生成

为展示所提出的单通道混沌方案的超宽带特性，我们将其应用于宽带太赫兹噪声源生成。如图 4a 所示，超宽带混沌信号通过光纤耦合器与连续波激光器合束，并精确调节光功率比以优化噪声特性。光谱平坦度主要取决于混沌

信号与连续波光之间的频率失谐；在我们的系统中，该失谐设置为 320 GHz，从而在 0-500 GHz 频段内获得最大平坦度（更多详情请参见补充说明10）。随后，合束信号由掺铒光纤放大器（EDFA）放大，并利用单行载流子光电二极管（UTC-PD）转换为电噪声源。

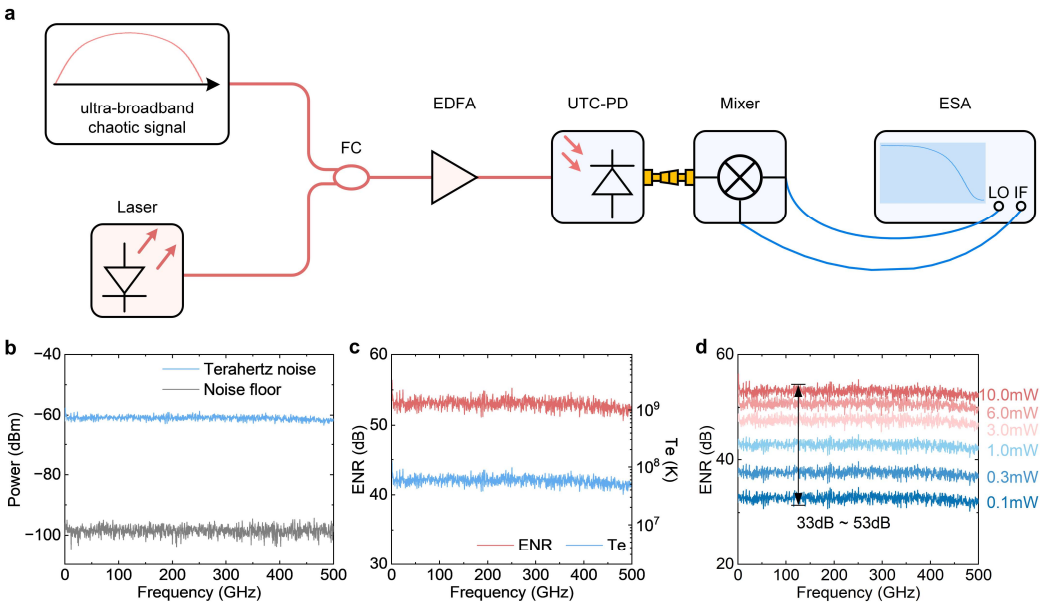


图4 超宽带光子混沌驱动的宽带太赫兹噪声源。a，噪声源生成仿真装置示意图。FC，光纤耦合器；UTC-PD，单行载流子光电二极管；ESA，电谱分析仪。**b**，生成的太赫兹噪声（蓝色）与系统噪声底（灰色）的实测功率谱密度。**c**，0–500 GHz 频段内计算得到的等效噪声比和等效噪声温度。**d**，不同输入光功率下的等效噪声比频谱。

图4b显示了测得的太赫兹噪声频谱（蓝色曲线）和系统噪声底（灰色曲线）。生成的噪声在整个0-500 GHz带宽内表现出优异的平坦度，其功率谱密度比系统基线高约40 dB，展现出较高的光谱均匀性和出色的超额噪声性能。为对此进行量化，我们计算了超额噪声比（ENR）和相应的等效噪声温度（NET）（见补充说明11），如图4c所示。在优化的工作条件下，该噪声源在0-500 GHz范围内的超额噪声比达到52.99 ± 2.85 dB，平均等效噪声温度为5.85×10^7 K，在带宽和热等效性方面均优于大多数已报道的噪声源。

通过调节掺铒光纤放大器的输出功率，可以轻松调节生成噪声源的超额噪声比。图 4d绘制了不同光功率下超额噪声比随频率的变化。该系统的超额噪声比可在32至53 dB范围内连续调节，同时保持优异的光谱平坦度。

基于可编程超宽带光子混沌的决策

多臂老虎机问题是强化学习中的一项基础挑战，核心是在未知奖励分布的情况下，在探索与利用之间实现最佳权衡[39]。利用光学混沌的光子决策系统，为提升计算效率和可扩展性提供了前景广阔的途径[40-42]，其优势源于混沌信号固有的随机性、高维动力学和多通道并行性。本节介绍一种基于我们可编程超宽带混沌梳平台的可扩展光子计算加速框架。图 5a 展示了所提出的光子计算加速系统方案。每个通道 $I_i(t)$ ($i = 1...N$) 对应一台奖励概率 P_i 未知的老虎机，目标是找出 P_i 最高的机器。在决策器中，每个混沌信号 $I_i(t)$ 都被数字化为 8 位，并保留 4 个最低有效位；随后进行延时异或（ XOR ）运算，以提取高熵随机序列 $A_i(t)$。决策信号 $D_i(t)$ 的计算公式为：

$$D_i(t) = A_i(t) + k \cdot B_i(t), \tag{1}$$

其中，k是可调偏置系数，$B_i(t)$ 是时变偏置项，用于反映累积奖励信息。选择$D_i(t)$最高的通道作为最优臂。使用拉锯法[40]迭代更新偏置值$B_i(t)$，以动态平衡探索与利用（详情请参阅“方法”）。

实验中，通过波形整形器配置可编程光子混沌平台，生成 16 个互不相关的并行混沌信道（如图 3e 所示），并依次对其进行检测，以解决 16臂老虎机问题。奖励概率设定为：$P_1 = 0.7$、$P_2 = 0.5$、$P_3 = 0.9$、$P_4 = 0.1$、...、$P_{2j-1} = 0.7$、$P_{2j} = 0.5$，其中老虎机 3 的奖励概率最高。图 5b 和 c 展示了

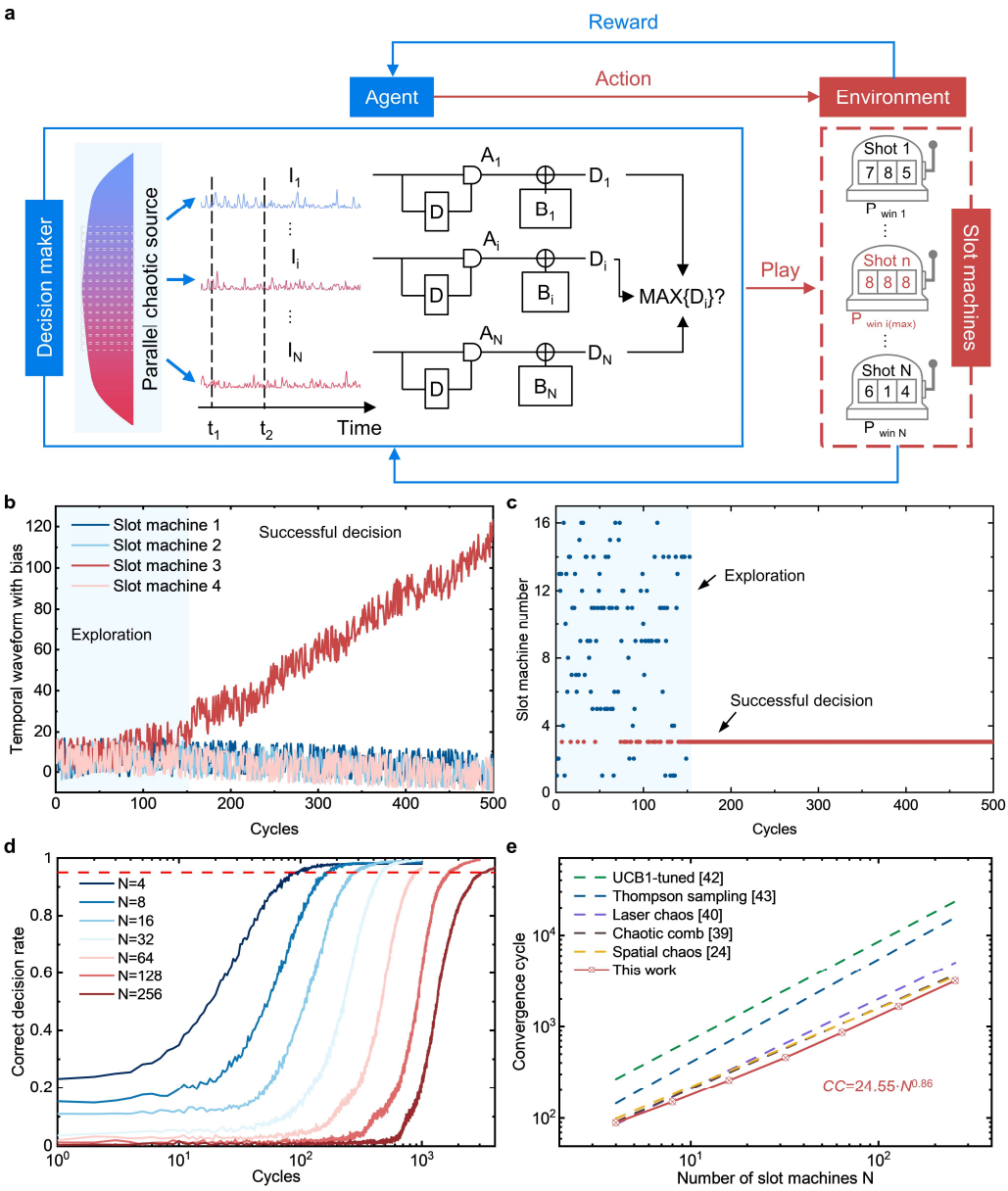


图 5 使用可编程并行光子混沌解决多臂老虎机问题。

a，利用可编程光子混沌平台生成的 16 信道不相关混沌信号的光子决策加速器架构。**b**，老虎机 1~4 的偏置混沌决策信号时域波形。**c**，16臂老虎机问题中的决策序列示例；收敛后，奖励概率最高的老虎机 3（红点）始终被选中。**d**，正确决策率随老虎机臂数的变化。**e**，我们的方法与先前方法在收敛周期数随臂数变化方面的比较。

决策过程的演变。在图 5b 中，经过偏置的混沌信号 $D_i(t)$

在初始试验期间表现出所有臂的可比振幅（为清晰起见，仅显示老虎机 1–4），反映了探索过程。随后，老虎机 3 的振幅占据主导，而其他老虎机仍受到抑制，表明已收敛至最优决策。相应地，图 5c 描绘了连续决策过程中所选臂索引的变化。尽管系统在早期试验中探索多个臂，但在大约第 150^{th} 次迭代后，它始终选择老虎机 3，展现出对最优臂的稳定识别。

为评估决策性能，我们将正确决策率（CDR）定义为 CDR = T_{hit}/T，其中 T_{hit} 表示每个决策周期内，在 $T = 1000$ 次独立试验中成功选择的次数。CDR 超过 95% 即视为成功决策，首次达到这一阈值的周期定义为收敛周期（*CC*）。图 5d 展示了光子决策系统的准确率和可扩展性。对于$N > 16$，采用 16 个可用信道的时分复用记录来合成更高维的输入。当N增加至 256 时，*CC*也相应增加，同时 CDR 保持在 > 95% ，表明该系统能够稳健地扩展至大规模多臂老虎机问题。图 5e 将我们的系统与现有的多臂老虎机问题求解方法进行了基准比较[24,40,41,43,44]。幂律拟合得到经验关系 $CC=24.55\cdot N^{0.86}$，表明其次线性缩放指数较为理想。与以往方法相比，我们的方法收敛最快，缩放指数最低，因此非常适用于大规模决策任务。此外，通过减小滤波器带宽和信道间隔，可以容纳更多混沌信道，从而在不损害可扩展性的前提下提高决策吞吐量。

讨论

总之，我们展示了一种可编程的“混沌梳”平台，该平台能够生成超宽带光子混沌，并通过两项应用验证了其性能。通过利用宽带混沌微波信号驱动标准电光频率梳，该系统生成相互重叠的混沌梳齿，实现了迄今报道的最高单通道混沌带宽。借助光波整形器，该平台还能够独立控制每个输出的中心波长和带宽，从而支持低相关并行混沌

生成最多50个可编程通道。在此系统基础上，我们展示了高性能太赫兹噪声生成，以及面向多臂老虎机问题的光子决策加速，凸显了其在先进技术应用中的巨大潜力。该平台解决了光学混沌领域长期存在的两项局限：突破了弛豫振荡导致的带宽上限，实现了有效带宽数量级的提升；并解决了通道数与单通道带宽之间的权衡问题，在16个并行、低相关通道上实现了>15 GHz的有效带宽。这些进展有望为光学混沌在高速多通道信息处理中的应用开辟新方向。

超宽带混沌光信号的带宽可通过两种主要方式进一步扩展。首先，增大混沌种子信号的带宽，可以拓宽每个梳齿的光谱宽度。在本研究中，通过外部光反馈生成的混沌种子信号带宽为~9 GHz，这限制了每个梳齿的有效光谱宽度。为确保完全的边带混叠，梳状谱重复频率 $\Delta\omega$ 设为32.5 GHz（参见补充说明4）。采用非线性光谱展宽等先进技术来扩展种子信号的带宽后，$\Delta\omega$ 也可相应增大，从而获得更宽的混沌光谱。其次，级联额外的电光调制器，可通过高阶边带生成增强光谱展宽。该架构中的带宽增益主要由相位调制驱动，采用半波电压更低的调制器或级联多个相位调制器，可进一步拓展带宽。在我们的实验中，两个级联的相位调制器产生了>700 GHz的光学带宽；预计采用三级级联配置可生成超过1 THz的平坦混沌光谱。

值得强调的是，目前的实验实现采用分立光学元件构建。然而，所有核心功能模块，包括混沌种子信号[45,46], 电光调制器[47,48], 和辅助光学元件[49,50], , 都已具备成熟的光子集成实现路径。随着片上集成和光子集成电路技术的发展[51,52], , 整个混沌驱动的

梳状架构可微型化并集成到芯片级平台上。 这一转变将显著降低系统尺寸、功耗和成本，为其在现实应用中的规模化实用部署铺平道路。

除了已展示的噪声生成和光子决策应用外，所提出的梳状混沌平台还具备独特能力，在一系列前沿领域展现出变革性潜力。在激光雷达领域，超宽带光谱可显著提高测距分辨率。在安全通信领域，高熵混沌载波有助于实现更高的数据速率和更强的加密鲁棒性。此外，该平台非常适用于高吞吐量信息处理任务，包括超快随机数生成和光子概率计算。这些应用场景彰显了该平台的多功能性，并使其成为突破光学混沌技术性能边界的实用且可扩展的解决方案。

方法

实验装置

实验配置如图 2a 所示。在光学反馈下，通过波长为 1549.66 nm 的分布式反馈（DFB）激光器产生混沌种子信号，其输出光的 30% 经由 3:7 光纤耦合器和反射镜反射回来。偏振控制器和可变光衰减器（VOA）用于调节反馈状态。利用 90°光学混合器，将混沌种子信号与来自可调谐激光器（Keysight, N7711A）的 1549.92 nm 连续波参考信号进行合并，并通过平衡光电探测器（BPD）进行外差探测，经频率下变频产生 32.5 GHz 的混沌微波信号。经过射频放大（MLA-100k50G- N5.0G25P）后，混沌微波信号通过功分器（Qotana，DBPD041800400A）分为三路，同步驱动级联电光调制系统。该系统由一个强度调制器（Conquer，Photonics KG- AM-15-40G-PP-FA）和两个相位调制器（Eospace，PM-5VEK-40-PFA-UV）组成。移相器用于确保最佳时序，同时将 PM 的驱动功率放大至~ 33 dBm，以最大化相位调制器调制深度（3.1 π）和光谱展宽。功率为 13 dBm、波长为 1558.98 nm 的连续波光载波依次通过

强度调制器和相位调制器。调制后的信号随后在 10 km 单模光纤中传输，以实现色散诱导的相位到强度转换，并由掺铒光纤放大器补偿损耗。所得超宽带混沌信号通过可编程光滤波器（Coherent，WaveShaper 4000A）进行光谱切片，从而实现灵活的并行混沌输出。光学输出通过光谱分析仪（Yokogawa，AQ6370D）进行分析，或由 40 GHz 光电探测器（OVLINK，PD-1000）探测，并使用实时数字荧光示波器（Keysight，DSA V204A，20 GHz，80 GSa/s）和电谱分析仪（Ceyear，4052H，50 GHz）进行测量。

决策方法

本研究采用基于拉锯法的光子决策策略。在实验中，依次采集来自 16 个混沌信道的时间序列 $I_i(t)$，并通过数字后处理进行滤波，以提取随机序列 $A_i(t)$。偏置决策信号 $D_i(t)$ 根据式 (1) 计算，其中 $B_i(t)$ 是按如下方式计算的动态偏置项：

$$B_i(t) = Q_i(t) - \frac{1}{N-1}\sum_{i' \neq i}^{N} Q_{i'}(t) \tag{2}$$

$$Q_i(t) = \alpha * W_i - \beta * L_i \tag{3}$$

$$\alpha = 2 - \hat{P}_{top1} - \hat{P}_{top2} \tag{4}$$

$$\beta = \hat{P}_{top1} + \hat{P}_{top2} \tag{5}$$

$$\hat{P}_i = \frac{W_i}{T_i} \tag{6}$$

其中，$Q_i(t)$ 表示老虎机i在周期t的评估值，N是老虎机总数。 T_i 表示老虎机i被选中的总次数， W_i 和L_i 分别表示胜利次数和失败次数。$\hat{}_iP$表示老虎机i的估计获胜概率，而$1\hat{}_{top}P$和$2\hat{}_{top}P$分别是所有老虎机中最高和第二高的估计获胜概率。选择$D_i(t)$最大的臂。偏置系数k用于调节探索与利用之间的权衡，其取值针对不同的老虎机数量进行优化，以最大化

决策性能。

参考文献

1. May, R. M. 简单数学模型与极其复杂的动力学。《自然》261, 459- 467 (1976)。 2. Soriano, M. C., García-Ojalvo, J., Mirasso, C. R. & Fischer, I. 复杂光子学：延迟耦合半导体激光器的动力学与应用。Rev. Mod. Phys. 85, 421-470 (2013)。 3. Zhao, A., Jiang, N., Liu, S., Zhang, Y. & Qiu, K. 利用私有混沌相位扰乱为波分复用光通信系统实现物理层加密。《光波技术杂志》39, 2288-2295 (2021)。 4. Zhang, Y. 等. 利用轨道角动量，同时提升自由空间光混沌通信的容量与安全性。Photonics Res. 11 (2023)。 5. Feng, J. 等. 基于人工智能的光电振荡器模型，以256 Gbit/s速率实现1600 km距离的混沌光通信。《光波技术杂志》, 1-10 (2024)。 6. Didier, P. 等. 在长波红外大气窗口中利用混沌光进行数据加密。Optica 11 (2024)。 7. Asmussen, S. & Glynn, P. W. 随机模拟：算法与分析。第57卷（施普林格，2007）。 8. Xiang, S. 等. 基于混沌半导体激光器网络、仅需极少后处理的2.24-Tb/s物理随机比特生成。《光波技术杂志》37, 3987-3993 (2019)。 9. Zhao, L. 等. 利用集成 AlGaAs 微谐振器的宽带混沌，实现 126 Tbits/s 大规模并行物理随机比特生成。Laser Photonics Rev. (2025)。 10. Bruckerhoff-Pluckelmann, F. 等. 利用混沌光进行概率光子计算。《自然·通讯》15, 10445 (2024)。 11. Liu, L. 等. 基于多模混沌激光器的通用毫米波噪声源。《光学与激光技术》181 (2025)。 12. Liu, W. 等. 基于两台法布里–珀罗激光器外差的宽带平坦毫米波噪声源。《光学快报》47, 541-544 (2022)。 13. Xu, Z. 等. 基于超宽带混沌光电振荡器的高分辨率雷达测距。《光学快报》31, 22594-22602 (2023)。 14. Lukashchuk, A., Riemensberger, J., Tusnin, A., Liu, J. & Kippenberg, T. J. 基于混沌微梳的并行测距。《自然·光子学》17, 814-821 (2023)。 15. Sun, Y. 等. 多色脉冲混沌实现单像素并行激光测距。PhotoniX 6 (2025)。 16. Sciamanna, M. & Shore, K. A. 激光二极管混沌的物理原理与应用。《自然·光子学》9, 151-162 (2015)。 17. Ohtsubo, J. 载于《半导体激光器：稳定性、不稳定性与混沌》33-82（施普林格，2017）。 18. Yang, Q. 等. 通过结合主动光反馈环路与高非线性光纤产生宽带混沌激光器。《光学快报》45, 1750-1753 (2020)。 19. Li, P. 等. 使用带通滤波器与光反馈多模激光器观察到平坦混沌的产生。《光学快报》27, 17859-17867 (2019)。 20. Han, Y. 等. 基于全局耦合半导体激光器网络，产生具有时延特征隐藏和超快光子决策能力的多通道混沌信号。Photonics Res. 8 (2020)。

21. Liu, S. 等。使用非对称耦合半导体激光器网络生成多个低相关混沌信号。《光学与激光技术》155（2022年）。22. Huang, Y.、Zhou, P.、Lau, K. 和 Li, N.。基于四个分布反馈激光器阵列的并行宽带混沌生成系统，以推进高吞吐量信息处理。《ACS光子学》11，5012-5021（2024年）。23. Chen, R. 等。利用并行混沌打破激光雷达的时间与频率拥塞。《自然·光子学》17，306-314（2023年）。24. Shen, B. 等。利用基于微梳的并行混沌实现随机数生成和光学决策。《自然·通讯》14，4590（2023年）。25. Cuevas, J.、Iwami, R.、Uchida, A.、Minoshima, K. 和 Kuse, N.。利用混沌微谐振器频梳解决多臂老虎机问题。《APL光子学》9（2024年）。26. Li, J. C.、Xiao, J. L.、Yang, Y. D.、Chen, Y. L. 和 Huang, Y. Z.。基于具有增强混沌带宽的自混沌微激光器的随机比特生成。《纳米光子学》12，4109-4116（2023年）。27. Bouchez, G.、Uy, C. H.、Macias, B.、Wolfersberger, D. 和 Sciamanna, M.。利用相位共轭反馈从激光二极管产生宽带混沌。《光学快报》44，975-978（2019年）。28. Wang, Y. 等。在具有光学反馈的圆形侧六边形谐振器微激光器中生成具有宽带平坦功率谱的激光混沌。《光学快报》28，18507-18515（2020年）。29. Zhao, A. 等。利用连续波激光器和带自相位调制注入的外腔激光器并行生成低相关宽带复杂混沌信号。Opto-Electronic Advances 5，200026-200026（2022年）。30. Cai, Q. 等。基于单个四分之一波长移位DFB激光器的太比特每秒并行随机数生成。《光学与激光技术》162（2023年）。31. Zhao, A. 等。利用光电混合反馈和并行滤波实现基于半导体激光器的多通道宽带混沌生成。《光波技术杂志》40，751-761（2022年）。32. Zhang, Q. 等。相位调制和啁啾光纤布拉格光栅反馈辅助的多通道宽带光学混沌生成。《光学快报》32，20471-20482（2024年）。33. Li, Q.、Jia, Z.、Wang, A. 和 Wang, Y.。利用带光学反馈的长腔法布里-珀罗激光器并行生成多通道宽带混沌。《光学快报》49，7126-7129（2024年）。34. Hu, C.-X. 等。基于两个单向耦合WRC-FPLD同时生成多通道宽带混沌信号。《IEEE光子学杂志》12，1-8（2020年）。35. Li, S. S.、Li, X. Z. 和 Chan, S. C.。通过光纤传输抑制混沌时延特征并展宽带宽。《光学快报》43，4751-4754（2018年）。36. VPIphotonics：仿真软件和设计服务。在线：https://www.vpiphotonics.com/index.php（2025年）。37. Lin, F.-Y.、Chao, Y.-K. 和 Wu, T.-C.。宽带混沌信号的有效带宽。《IEEE量子电子学杂志》48，1010-1014（2012年）。38. Grassberger, P. 和 Procaccia, I.。从混沌信号估计柯尔莫哥洛夫熵。Phys. Rev. A 28，2591-2593（1983年）。39. Matsuo, Y. 等。深度学习、强化学习和世界模型。《神经网络》152，267-275（2022年）。40. Morijiri, K. 等。用于利用光学

时空混沌进行决策的并行光子加速器。Optica 10（2023年）。41. Morijiri, K.、Mihana, T.、Kanno, K.、Naruse, M. 和 Uchida, A.。利用半导体激光器中混沌时间波形的偏置控制，为大规模多臂老虎机问题进行决策。《科学报告》12，8073（2022年）。42. Xu, Z. 等。利用非线性光电振荡器加速强化学习。PhotoniX 6（2025年）。43. Auer, P.、Cesa-Bianchi, N. 和 Fischer, P.。多臂老虎机问题的有限时间分析。Mach. Learn. 47，235-256（2002年）。44. Thompson, W. R.。根据两个样本的证据，一个未知概率超过另一个未知概率的似然。Biometrika 25，285-294（1933年）。45. Chai, M. 等。波长可调单片集成混沌半导体激光器。《光波技术杂志》40，5952-5957（2022年）。46. Wang, Y. 等。带光电反馈的混合集成光学混沌电路。《光学快报》32（2024年）。47. Zhang, K. 等。一种高功率效率的集成铌酸锂电光频率梳发生器。Commun. Phys. 6（2023年）。48. Qi, Y.、Yue, G.、Hao, T. 和 Li, Y.。用于无刻蚀薄膜集成光子学的强限制低折射率肋加载波导结构。Opto-Electronic Advances 8（2025年）。49. Zhou, J. 等。在绝缘体上掺铒薄膜铌酸锂上片上集成波导放大器。Laser Photonics Rev. 15（2021年）。50. Xie, Y. 等。低损耗芯片级可编程硅光子处理器。Opto-Electronic Advances 6，220030-220030（2023年）。51. Huang, H. 等。面向片上集成的高强度空间模式可调频率上转换器。Opto-Electronic Science 3，230036-230036（2024年）。52. Di Falco, A.、Mazzone, V.、Cruz, A. 和 Fratalocchi, A.。通过在不可逆时变硅芯片中混合混沌波实现完美保密密码学。《自然·通讯》10，5827（2019年）。

致谢

本研究获得国家自然科学基金委员会（NSFC）（项目编号：U24A6010、62575286、62401540）和中国博士后科学基金会（项目编号：2024M753238）资助。

作者贡献

Y.Q.Z.、M.F.X.提出研究构想并制定研究计划。S.Y.S.、M.J.Z.、X.L.Y.和Y.X.Y.进行了超宽带光学混沌仿真。S.Y.S.、M.J.Z.和X.L.Y.设计并开展了实验。Y.Q.Z.、S.Y.S.和Q.C.参与了数据分析。S.Y.S.、Y.Q.Z.和M.F.X.撰写了手稿。Y.H.G.和M.B.P.提出了改进本研究质量的建议。M.B.P.和X.G.L.负责监督该项目。所有作者均讨论并分析了数据和结果。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

数据可用性

用于生成图表并支持本研究所报告结论的所有数据，均可向通讯作者索取。