将脉冲式 VCSEL 神经元与硅光子学权重库互连，迈向集成神经形态光子系统

Matˇej Hejda,[1] Eli A. Doris,[2] Simon Bilodeau,[2] Joshua Robertson,[1] Dafydd Owen-Newns,[1] Bhavin J. Shastri,[3] Paul R. Prucnal,[2] 和 Antonio Hurtado[1], *[1] *Institute of Photonics, SUPA Dept of Physics, University of Strathclyde, Glasgow, U.K.* [2] *Dept of Electrical and Computer Engineering, Princeton University, Princeton, USA* [3] *Department of Physics, Engineering Physics and Astronomy, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada*（日期：2023年5月2日）

脉冲神经元和神经网络是脑启发计算的基本构成单元，而脑启发计算有望从光子硬件实现中显著受益。在本研究中，我们通过实验研究了一种互联系统，该系统基于超快脉冲式垂直腔面发射激光器神经元和硅光子学（SiPh）集成微环谐振器（MRR）权重库，并展示了这些器件的两种不同功能配置。首先，我们展示了 MRR 权重库可与脉冲式 VCSEL 神经元配合，用于对亚纳秒光脉冲信号进行幅度加权。其次，我们展示了连续发放的 VCSEL 神经元可通过经单个加权微环传输的锁定信号直接调制，并利用这一功能通过微环谐振器的热调谐实现光学尖峰发放率编码。鉴于集成式权重库和光子垂直腔面发射激光器神经元均已取得显著进展，我们认为这些结果证明了将这两类器件结合起来、用于功能性神经形态光子系统的可行性。

arXiv:2305.00788v1 [physics.optics] 1 May 2023

一、引言

随着可用数据和生成数据量呈指数级增长，对大规模、复杂数据进行处理的需求不断增加。可以说，最先进的数据处理能力来自机器学习（ML）和人工智能（AI）算法，推动了这些方法在规模和复杂性上的大幅扩展。尽管利用大规模、最先进的人工智能模型已经取得了令人瞩目的成果，但这些计算方法显著的能耗和碳足迹 [1] 不容忽视。此外，当前通用数字芯片架构在进一步缩小尺寸方面正逐渐接近物理极限，这进一步凸显了面向特定应用、经过优化的计算硬件的必要性。受大脑架构及其极低功耗的启发，神经形态工程领域致力于设计新型计算架构，借鉴生物网络中神经元的运行机制和结构，以提高人工智能计算的速度和效率。目前，已有多种技术被积极研究用于神经形态计算，其中颇具前景的候选技术包括自旋电子学 [2],忆阻器 [3, 4]和光子学 [5], 等。

脉冲神经元和脉冲神经网络（SNNs）代表了第三代人工神经网络（ANNs） [6] ，对未来的神经形态计算平台尤其重要。在 SNNs 中，节点间的通信以稀疏编码、基于事件的方式实现；不同于前几代人工神经网络，它们天然地利用时间来表示信息。值得注意的是，在光子域中使用稀疏编码的尖峰信号，还具有一些理想的额外优势，例如低损耗波导、光子系统无与伦比的带宽，以及实现极低能耗运行的潜力 [7]。神经形态光子学领域正在迅速发展，已有多种方法和光子器件展现出此类系统所需的特定行为与功能。研究人员已在相变材料 [8], 、微环谐振器 [9], 、光子晶体 [10],、超导约瑟夫森结光电子学 [11], 、半导体 [12] 和石墨烯基激光器 [13], 、与可兴奋共振隧穿二极管耦合的激光器 [14, 15], 、光调制器 [16] 以及半导体光放大器[17]中，展示了可直接应用于基于脉冲的信息处理的光学脉冲和兴奋性。

在这项工作中，我们将神经形态光子学领域中两种前景广阔的系统结合起来：一种基于垂直腔面发射激光器（VCSELs）的脉冲式人工光子神经元 [18] ，以及集成于硅光子学平台的微环谐振器（MRR）权重库 [19, 20]。得益于成熟的制造技术（可实现大规模生产）以及紧凑的器件尺寸，VCSELs 已应用于各种实际场景，

* antonio.hurtado@strath.ac.uk

从电信系统到生物识别扫描仪。研究还表明，VCSELs 能够呈现丰富多样的激光动力学，其中可激发尖峰现象对神经形态工程领域尤为重要。通过注入锁定或电调制 [23]，VCSELs 可轻易实现亚纳秒级光学脉冲机制，并可对其进行激活 [21] 和抑制 [22]，从而实现类似神经元的脉冲动力学。另一方面，硅中的微环谐振器（MRRs） [24]构成了许多实用光子集成电路（PIC）的基础，包括集成真时延 [25], 、波束转向 [26], 、用于高性能计算的密集波分复用（DWDM） [27],、具备自学习能力的神经突触网络 [8], 、机器学习 [28, 29], 等。特别是，基于 MRR 的权重库 [19, 20]已成功应用于机器学习中的光子神经元线性前端（即光子突触） [28, 29]。由于 MRR 权重库可通过波分复用（WDM）实现固有的可扩展性，在脉冲神经网络中展示其应用，表明它在扩展至互连程度更高、适用于更复杂任务的网络架构方面前景广阔。

本文通过实验展示了两种将垂直腔面发射激光器与硅光子微环谐振器结合使用的功能布局：利用权重库中的单个微环，对高速（亚纳秒级）VCSEL 神经元尖峰信号进行突触尖峰幅度加权（验证了 [19] 中从理论上提出的功能）；以及一种尖峰率编码机制，其中连续（强直）发放的 VCSEL 神经元由微环提供的锁定（注入）信号直接调制。这两种不同的实验布局展示了这两个系统如何以多种方式协同工作，从而实现基于脉冲的信息处理所需的功能。本文结构如下：第二节介绍实验中使用的两种器件及其特性。第三节描述实验装置，并介绍在微环中对 VCSEL 神经元进行脉冲加权所取得的结果；第四节则展示通过权重库微环谐振器进行注入功率调制，从而在 VCSEL 神经元中实现的尖峰率编码。最后，第五节给出讨论与结论。

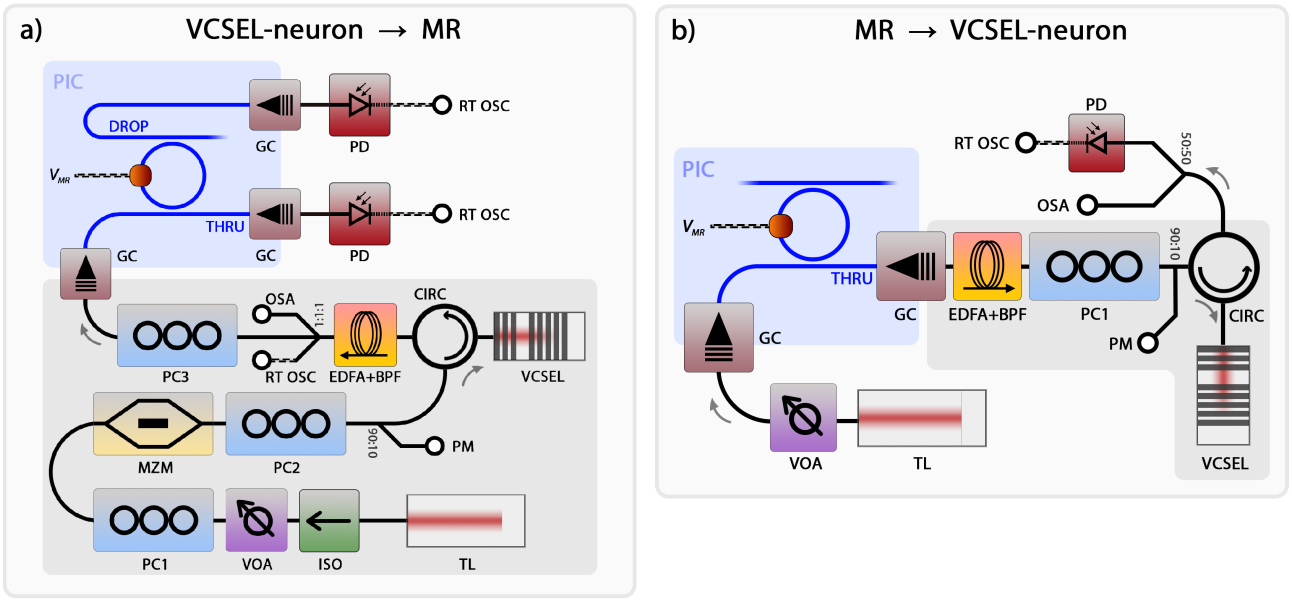

图1：实验装置：a）微环中的脉冲加权；b）通过微环传输的信号直接调制垂直腔面发射激光器。TL——可调谐激光器；ISO——隔离器；VOA——可变光衰减器；PC(1,2,3)——偏振控制器；MZM——马赫-曾德尔调制器；PM——功率计；CIRC——环行器；VCSEL——垂直腔面发射激光器；EDFA——掺铒光纤放大器；BPF——带通滤波器；RT OSC——实时示波器；OSA——光谱分析仪；GC——光栅耦合器；PD——光电探测器。标示的比率对应功率耦合器/分光器。

II. 器件表征

在本研究中，我们使用工作于标准电信波长 1550纳米的电信波长VCSEL。该垂直腔面发射激光器的发射光谱呈现两个峰，分别对应器件基横模的两个正交偏振态。较长波长的模式占主导地位（主激射模），而另一模式受到抑制（次模）。沿用先前研究中的记号 [30], ，这两个模式也可以

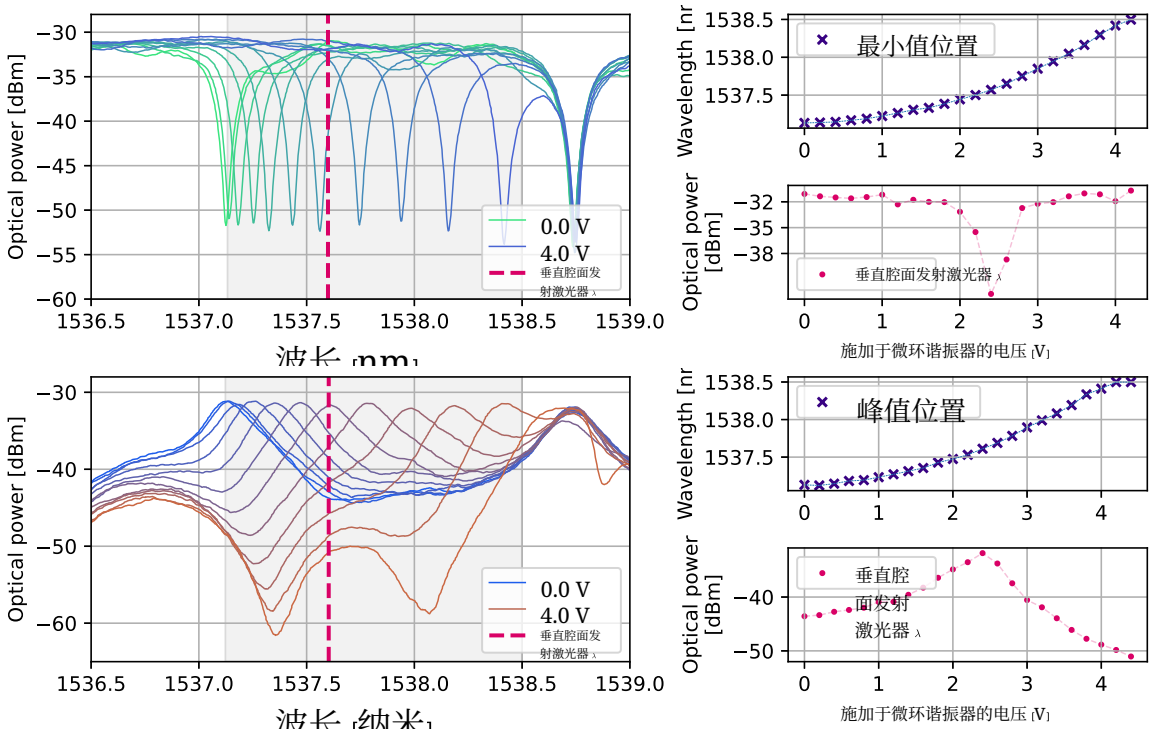

图2：微环谐振器表征：直通端口读出（上）和下载端口读出（下），以及固定波长处的功率（虚线）和极大值（极小值）位置随 V_{MR} 的变化。

称为基模的正交偏振和与其平行的偏振。这两个光谱峰相隔约 250 pm。激射阈值约为 $I_T \approx 1.5\,\mathrm{mA}$。众所周知，垂直腔面发射激光器具有多种非线性动力学行为。为实现兴奋性和脉冲动力学，需向激光器注入偏振匹配的外部信号，并使其具有较小的负频率失谐 Δ_f。在这种工作状态下，若注入信号的幅度（功率）扰动足够强（超过某个“阈值”功率），便可能引发亚纳秒脉冲响应。VCSEL 神经元的脉冲响应呈现兴奋性的所有典型特征，例如全或无特性和不应期（迟滞期）；其动力学行为类似于漏积分发放神经元模型 [31]。

本实验使用的微环谐振器（MRR）是四微环谐振器权重组 [20] 的一部分，该权重组支持广播与加权操作 [19]。在此权重组中，所有微环谐振器均采用“加-下载”配置，相邻的直通/输入端口彼此连接，相邻的加/下载端口也彼此连接。该权重组位于一块由 Advanced Micro Foundry (AMF) 在 CMC Microsystems 组织协调的多项目晶圆（MPW）流片中制造的芯片上。芯层为厚度 220 nm 的硅，带状总线波导和环形波导宽 500 nm。总线耦合器间隙为 200 nm，四个微环谐振器的半径约为 $8\ \mu\mathrm{m}$，并略有差异，以产生约 1 nm 的谐振间距。图2显示了该权重组的下载端口和直通端口光谱，其中标出了一个调谐谐振（灰色区域）及其附近的一个固定谐振。正如预期，随着调谐微环谐振器发生变化，未调谐微环谐振器的谐振保持不变，这表明串扰较低，且微环谐振器能够独立运行。图中还显示了给定固定波长处的预期功率（红色虚线标示）以及调谐谐振的极值位置随加热元件偏置电压的变化；该加热元件用于控制微环谐振器的谐振频率。

III. 神经元后加权：垂直腔面发射激光器 → 微环谐振器

首先，我们研究将集成微环谐振器作为光子权重组的一部分，是否可行，以便对 VCSEL 神经元输出的光脉冲信号幅度进行可控加权。在外部调制光信号 [30] 注入时，VCSEL 会确定性地产生待加权的亚纳秒尖峰。随后，尖峰信号被耦合至集成光子电路，其中单个微环通过对环形加热元件进行热控制来改变信号（尖峰）幅度。

A. 方法

VCSEL-MRR 系统的实验装置如图 1(a) 所示。注入 VCSEL 神经元的光信号由可调谐激光器（EMCORE micro-ITLA）提供。光注入线路的调制由任意波形发生器（Tektronix AWG7122B，12 GSa s^{-1}）产生，并通过基于光纤的马赫-曾德调制器实现；调制信号为宽度 750 ps（8 Sa）、间隔 4.66 ns（8×7 Sa）的方脉冲，任意波形发生器的峰峰值数模转换器量程设为 600 mV。注入光进入 VCSEL 前，经一个 90:10 光纤分路器分光，其中 10% 的分支用于注入功率监测。90% 功率的分支通过环行器馈入 VCSEL，环行器也可用于获取 VCSEL 的输出信号。VCSEL 的偏置电流为 5 mA（阈值为 1.5 mA），相对于器件的正交偏振模式，注入失谐约为 -3 GHz，注入线路功率为 170 μW。随后，VCSEL（环行器）输出经掺铒光纤放大器（PriTel）放大，并由一分四光纤分路器（Thorlabs）等分。这些输出用于向硅光子芯片提供信号，同时还用于通过光电探测器和实时示波器（PD、RT OSC；Discovery Semiconductors Lab Buddy、Tektronix MSO/DPO70000）直接监测 VCSEL 输出的时间波形记录，以及通过光谱分析仪（OSA；Apex Technologies）监测 VCSEL 的光谱。

在本实验中，注入锁定VCSEL神经元持续受到专用方波扰动序列的扰动，该序列对注入进行调制，从而在 VCSEL 输出端产生确定性、等间距的单个亚纳秒尖峰。为执行加权，在每个扫描步长中，通过给定的直流电压 V_{MR} 对硅光子芯片上的选定微环进行扫描。光纤中的光通过代工厂提供的光栅耦合器耦合至芯片，这些光栅耦合器针对1550 nm光、8度入射角进行了优化。由OZ Optics制造、以8度角抛光的8光纤V形槽阵列被置于芯片上8个光栅耦合器阵列的上方。第一个和最后一个光栅耦合器通过总线波导直接连接，从而可以通过监测恒功率对准信号来进行光学对准和损耗测量。向对准端口注入10 dBm的输入信号，在最佳对准状态下，输出光电探测器处测得的功率约为–3 dBm。这表明每个光栅耦合器的损耗约为6–7 dBm，这对于实际应用中的此类结构而言是典型值。

未来，若能证明 VCSEL 神经元可以直接级联，便可减少多种损耗来源，并从光路中移除掺铒光纤放大器。为此，光子线键合 [32]为实现低于 1 dB 的损耗 [33] 提供了潜在方案，可用于将光纤耦合至光子芯片。类似地，边缘耦合器 [34, 35], 通常也能实现较低的损耗，但其耦合效率往往容易受到环境影响而不稳定，而光子线键合则不存在这一问题。

B. 结果

对每个 V_{MR}，均采集了一段包含 $n_s = 7$ 尖峰的时间波形记录。总共记录了 29 个电压步进，从 V_{MR} =1 V 到 3.9 V，步进幅度为 100 mV。为进行统计评估，该扫描重复了 $n_m = 15$ 次。每种情况下，均记录以下信号：1）VCSEL 直接输出，2）微环谐振器的直通端口，以及 3）微环谐振器的下拉端口。所有从微环直通端口采集的时间波形记录均以红色显示，所有从下拉端口采集的波形记录均以绿色显示。图 3 展示了两个端口在 V_{MR} 三个选定取值下记录的单条时间波形示例，清楚地表明扫描微环谐振会改变记录到的尖峰幅度。此外，将在相同实验参数下采集的每条 $n_m = 15$ 波形记录切分为较小的时间分箱，每个分箱中包含一个微环谐振器加权尖峰（这些分箱以图 3 中的彩色阴影表示）。在每个分箱内找到最大值（尖峰峰值），并以该尖峰峰值的位置作为对齐参考，将包含单个尖峰的所有分箱波形记录（总计 15×7 条）叠加并求平均，从而为每个 V_{MR} 获得一个代表性加权尖峰。这样可避免因波形记录轻微错位或抖动而造成的平均误差。这些平均后的代表性尖峰见图 4。计算出代表性尖峰后，将其最大值保存为代表性尖峰幅度。对微环谐振器的下拉端口和直通端口采用了相同的处理流程。得到的代表性尖峰峰值幅度见图 5(a,b)。在极值附近的区间内，使用洛伦兹函数对两幅图进行拟合，结果表明，在该微环偏置电压范围内，拟合效果良好。直通端口光电探测器的时间波形记录不包含直流信号分量（VCSEL 在阈值以上工作时持续发出的激光）。因此，也对下拉端口信号进行了数值滤波，以去除该直流分量，从而比较性质相同的信号。

IV. 神经元前调制：

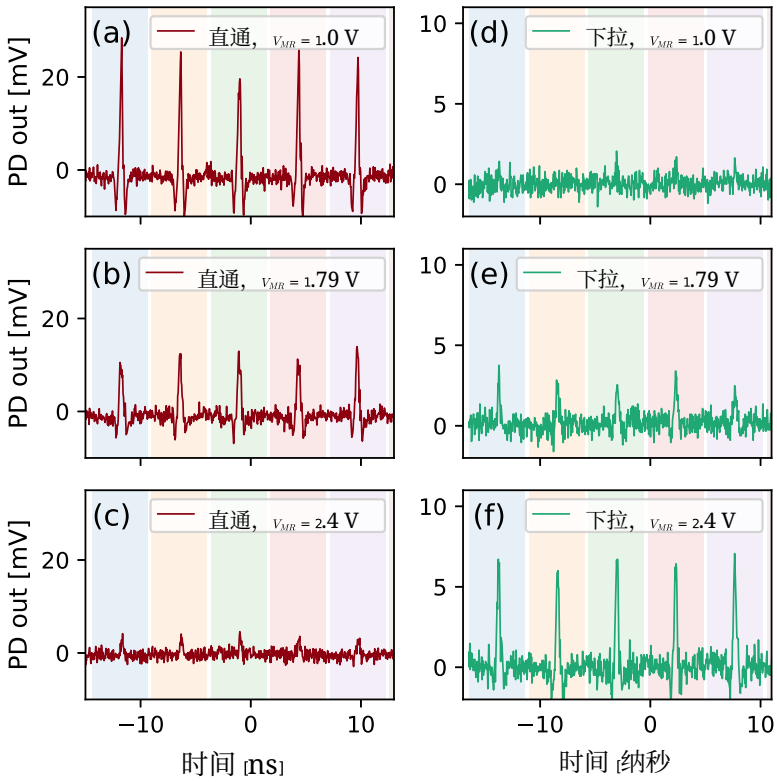

图3：VCSEL 神经元中经加权微环处理后，在三种不同的 V_{MR} 值下确定性触发的可激发尖峰序列。波形记录取自微环的两个输出端：直通端口（左列，红色）和下载端口（右列，绿色）。

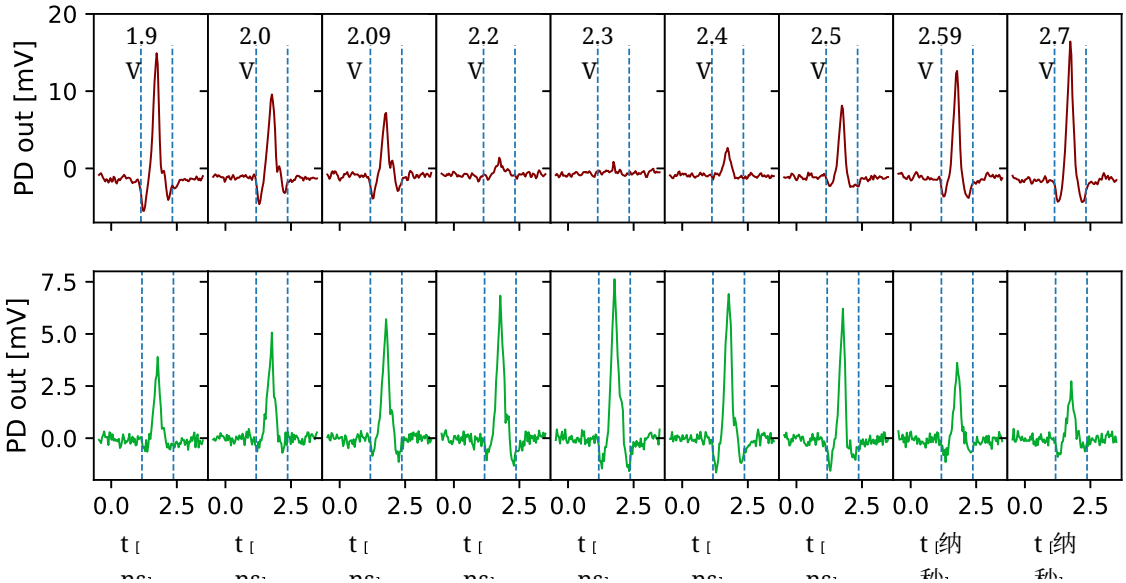

图4：展示微环谐振器输出的直通端口（上排）和下载端口（下排）的尖峰幅度加权。在每种情况下，所示尖峰波形记录对应于根据给定 V_{MR} 值下记录的所有重复波形计算出的平均尖峰包络。

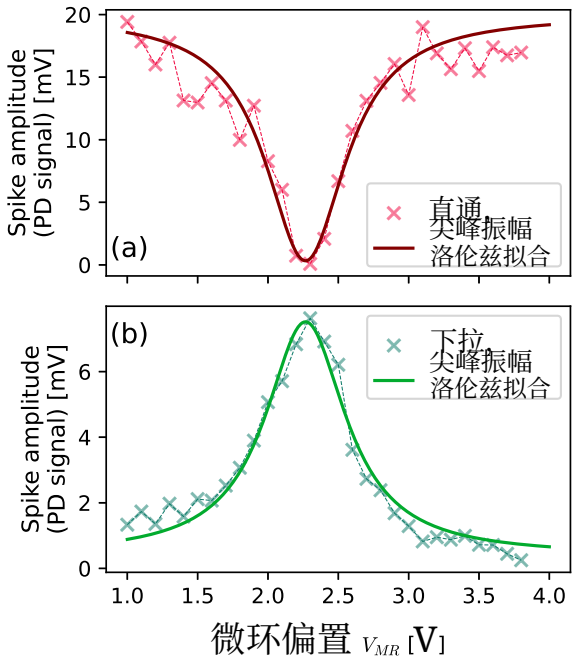

图 5：所有尖峰的平均幅度（每次测量 $n_s = 7$ ，重复 $n_m = 15$ 次）随微环加热器偏置 V_{MR} 的变化关系，实线为采用最小二乘法进行的洛伦兹拟合。两幅图分别显示：(a) 直通端口；(b) 下载端口读数。

微环谐振器 → 垂直腔面发射激光器

在本节中，我们使用集成权重库中单个微环的加权输出，并将垂直腔面发射激光器注入锁定到该信号，以实现脉冲式垂直腔面发射激光器神经元。通过微环直接调制恒定锁定信号并改变其功率，我们在垂直腔面发射激光器神经元中引入连续的脉冲动力学，其尖峰发放频率与输入功率 [36] 成反比。垂直腔面发射激光器能够将模拟信号直接编码为连续、实时编码的尖峰序列，并将输入信号幅度映射为局部尖峰发放率 [36] ；这一能力为将垂直腔面发射激光器用作尖峰域输入编码器带来了希望。此前，研究人员已在多通道（RGB）数字图像 [37] 上展示了这一功能，采用的是一种时分复用、易于实现的单垂直腔面发射激光器神经元布局。

A. 方法

为实现垂直腔面发射激光器对来自硅光子芯片信号的直接注入锁定，我们选用了一种谐振波长与VCSEL发射波长匹配的微环。来自可调谐激光器（EMCORE micro- ITLA）的信号经过可变光衰减器后，输入加权微环。随后，信号从该微环的直通端口耦合出芯片并进入光纤。芯片输出经微环加权的信号后，使用掺铒光纤放大器（带带通滤波器）进行放大，再经偏振控制器和环行器注入垂直腔面发射激光器，注入功率为 $P_{inj} \approx 220\mu\mathrm{W}$。调整该信号的偏振，以确保锁定在正交（主导）偏振态，并调整波长，使注入失谐约为$-3.75\mathrm{GHz}$。随后，经环行器采集VCSEL 神经元的输出，并使用实时示波器上的放大光电探测器（Discovery Semi LabBuddy）记录。

B. 结果

微环谐振器 → 垂直腔面发射激光器实验结果如图 6 所示。对微环偏置电压 V_{MR} 进行扫描，电压范围为 1.5 V 至 4.2 V，步进为 150 mV（共 21 步）。每个 V_{MR}均记录一段 40 ns 的波形记录，

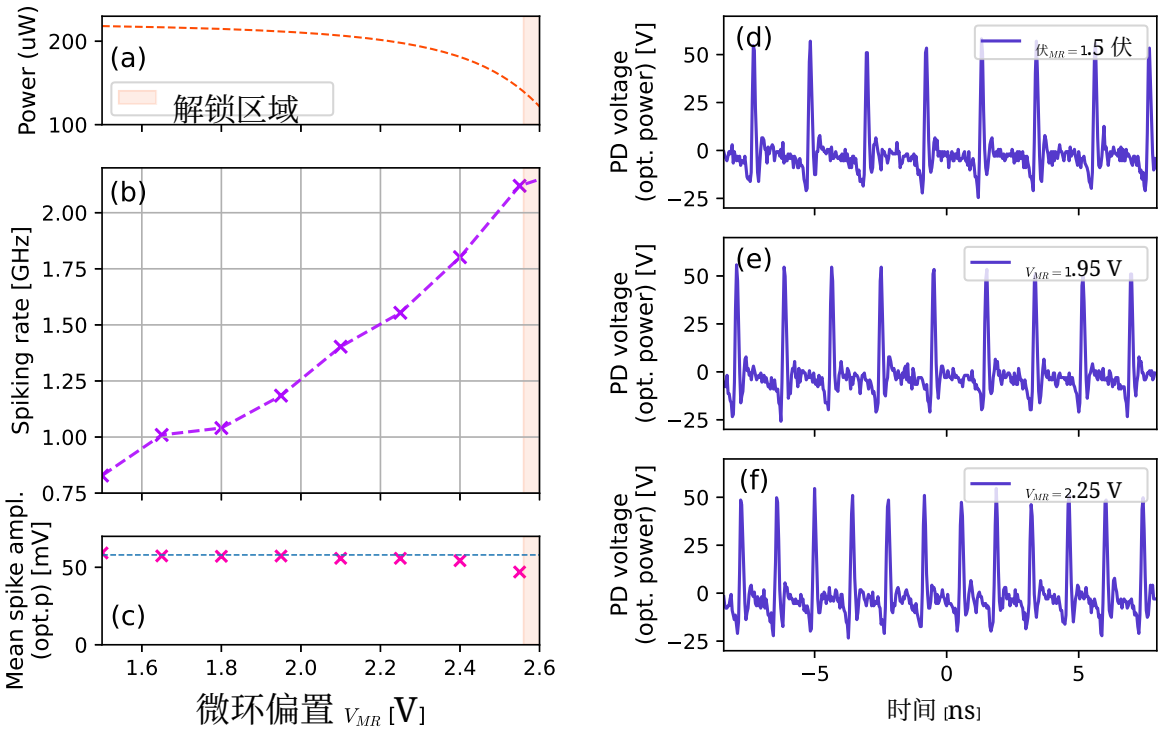

图 6：演示由 MRR 信号注入锁定的脉冲式垂直腔面发射激光器神经元中的速率编码。(a) 注入信号功率随 V_{MR} 变化。(b) VCSEL 神经元中的尖峰发放率随V_{MR}变化。(c) 尖峰序列中的平均尖峰幅度。(d-f) VCSEL 神经元锁定到来自 MRR 的信号后产生的连续尖峰轨迹示例。随着施加到微环上的电压从 (a) 1.5 V 逐渐升高，经由 (b) 1.95 V 至 (c) 2.25 V，尖峰发放率单调增加。

随后统计单个尖峰数，并根据记录时长（t_{len}=40ns）计算局部尖峰率。该过程重复 $n = 12$ 次，最终以这 $n = 12$ 个局部尖峰率的平均值，得到具有代表性的发放率（及其与所施加微环偏置 V_{MR}的关系）。

图 6(a) 显示了 VCSEL 的锁定信号光功率随 V_{MR} 变化的情况。随着微环谐振在 V_{MR} 扫描过程中向锁定信号的波长移动，直通端口处的输出功率下降。在用于 VCSEL 神经元的注入锁定配置中，这意味着锁定信号减弱。对于处于连续发放状态的 VCSEL，这会使尖峰频率 [36] 升高，随后转变为不同的动力学现象。图 6(b) 中尖峰发放率单调增加，展示了这一现象。在实验开始时给定的实验条件下（微环谐振频率远离锁定信号频率），VCSEL 神经元以 $\approx$ 750MHz 的平均尖峰发放率连续发放，该发放率逐渐升高至 ≈ 2.25 GHz；这大致代表该 VCSEL 可达到的最高尖峰发放率，本例中在 $V_{MR} = 2.55$V 时达到。图 6(d-f) 展示了不同 V_{MR} 值下 VCSEL 神经元输出波形记录的示例，也体现了尖峰发放率调制效应。

进一步增大微环偏置时，随着微环谐振的临近，直通端口处的功率显著下降。在 VCSEL 神经元中，对于如此显著的输入注入功率降低，我们观察到其动力学逐渐从连续、清晰且重复的尖峰转变为类似周期 1 的动力学，同时振荡幅度明显降低，随后注入锁定被打破，并出现类似振荡的动力学。这一现象在图 6(c) 中表现为记录到的平均尖峰幅度突然下降。对于如此低水平的注入信号，VCSEL 神经元的注入锁定会（暂时）被打破，VCSEL 表现为自由运行激光器，不再呈现脉冲动力学。因此，为了利用这种布局在 VCSEL 神经元中实现速率编码，应仅使用微环动力学范围的一部分，以避免在接近微环谐振时发生失锁。

V. 讨论与结论

本研究首次通过实验展示了脉冲式光子 VCSEL 神经元与集成式微环谐振器权重库之间的互连，重点关注未来可扩展光子神经计算所需的两项关键功能：脉冲加权和全光速率编码。在当前这两种功能布局的首次迭代中，均采用电信波长VCSEL，通过光栅耦合器将其与芯片外的光子集成电路（PIC）上的微环（权重库）耦合。尽管采用芯片外激光器进行耦合，在实验实现过程中能够提供额外的灵活性和控制能力，但最终目标是实现一个完全集成于芯片上的系统。这样的系统将显著提高实用性，尤其是因为它能够减小整体空间占用面积，并且可能更好地控制环境诱导噪声。此外，我们认为，VCSEL 输出在光脉冲期间的偏振效应，可能为波长敏感加权提供额外且有趣的功能，例如在微环中的应用。由于可激发光脉冲是通过扰动注入 VCSEL 神经元的信号而产生的，因此在神经元处于激活状态时，激光器会经历一个动态变化过程，其中可能涉及两种相互正交的偏振态之间的短暂切换 [21]。这可能为组合式 VCSEL-MRR 系统中更先进的加权方案带来潜力，作者将对此开展进一步研究。

总之，我们通过实验展示了脉冲式垂直腔面发射激光器神经元与微环谐振器权重库协同运行，用于全光基于脉冲的信息处理。我们验证了脉冲加权布局（VCSEL → MRR）和直接速率编码布局（MRR → VCSEL），证明这两种系统彼此兼容，可作为构建更大型混合光子脉冲网络的可行构建模块，并实现亚纳秒脉冲时间。本研究为新型、更先进的全芯片布局开辟了新途径，将激光器用作脉冲神经元，并结合集成式权重库，为未来功能性神经形态计算光子硬件提供支持。

VI. 致谢

作者感谢欧盟委员会（资助项目 828841-ChipAIH2020-FETOPEN- 2018-2020）以及英国研究与创新署（UKRI）图灵人工智能加速奖学金计划 4-（EP/V025198/1）提供的支持。S. Bilodeau 感谢魁北克自然与技术研究基金会提供的资助。B. Shastri 感谢加拿大自然科学与工程研究委员会（加拿大自然科学与工程研究委员会）提供的资助。

---

[1] E. Strubell、A. Ganesh 和 A. McCallum，《自然语言处理中的深度学习：能源与政策考量》（2019），类型：文章 arXiv：1906.02243。[2] J. Grollier、D. Querlioz、K. Y. Camsari、K. Everschor-Sitte、S. Fukami 和 M. D. Stiles，《神经形态自旋电子学》，《自然·电子学》**3**，360（2020）。[3] D. Markovi´c、A. Mizrahi、D. Querlioz 和 J. Grollier，《神经形态计算物理学》，《自然评论·物理学》**2**，499（2020）。[4] R. A. John、Y. Demira˘g、Y. Shynkarenko、Y. Berezovska、N. Ohannessian、M. Payvand、P. Zeng、M. I. Bodnarchuk、F. Krumeich、G. Kara、I. Shorubalko、M. V. Nair、G. A. Cooke、T. Lippert、G. Indiveri 和 M. V. Kovalenko，《用于神经形态计算的可重构卤化物钙钛矿纳米晶忆阻器》，《自然通讯》**13**，2074（2022）。[5] B. J. Shastri、A. N. Tait、T. Ferreira de Lima、W. H. P. Pernice、H. Bhaskaran、D. C. Wright 和 P. R. Prucnal，《用于人工智能和神经形态计算的光子学》，《自然·光子学》**15**，102（2021）。[6] W. Maass，《脉冲神经元网络：第三代神经网络模型》，《神经网络》**10**，1659（1997），出版商：Pergamon。[7] D. A. B. Miller，《面向低能耗信息处理与通信的阿焦耳光电子学》，《光波技术杂志》**35**，346（2017）。[8] J. Feldmann、N. Youngblood、D. C. Wright、H. Bhaskaran 和 W. H. P. Pernice，《具备自学习能力的全光脉冲神经突触网络》，《自然》**569**，208（2019），出版商：Springer US。[9] Y. Han、S. Xiang、Y. Zhang、S. Gao、A. Wen 和 Y. Hao，《用于脉冲序列学习的全微环谐振器光子脉冲神经网络》，《光子学》**9**，120（2022），第2期，出版商：多学科数字出版研究所。[10] F. Laporte、A. Katumba、J. Da mbre 和 P. Bienstman，《利用光子晶体腔进行神经形态计算的数值演示》，《光学快报》**26**，7955（2018）。[11] J. M. Shainline、S. M. Buckley、R. P. Mirin 和 S. W. Nam，《用于神经形态计算的超导光电子电路》，《物理评论应用》**7**，034013（2017）。[12] M. A. Nahmias、A. N. Tait、B. J. Shastri、T. Ferreira de Lima 和 P. R. Prucnal，《混合硅中的可激发激光处理网络节点：分析与仿真》，《光学快报》**23**，26800（2015）。[13] A. Jha、C. Huang、H.-T. Peng、B. J. Shastri 和 P. Prucnal，《光子脉冲神经网络与石墨烯覆硅脉冲神经元》，《光波技术杂志》，1（2022）。

[14] I. Ortega-Piwonka、M. Hejda、J. A. Alanis、J. Louren˙co、A. Hurtado、J. M. L. Figueiredo、B. Romeira 和 J. Javaloyes，《基于纳米激光器的光电子神经元中的尖峰传播》，《光学材料快报》10.1364/OME.451706（2022）。[15] M. Hejda、J. A. Alanis、I. Ortega-Piwonka、J. Louren˙co、J. Figueiredo、J. Javaloyes、B. Romeira 和 A. Hurtado，《用于基于尖峰的神经形态信息处理的共振隧穿二极管纳米光电子可激发节点》，《物理评论应用》17，024072（2022）。[16] G. Mourgias-Alexandris、A. Totovic、A. Tsakyridis、N. Passalis、K. Vyrsokinos、A. Tefas 和 N. Pleros，《采用双路IQ调制单元的相干线性神经元神经形态光子学》，《光波技术杂志》38，811（2020）。[17]B. Shi、N. Calabretta 和 R. Stabile，《通过基于 InP SOA 的光子集成交叉连接实现深度神经网络》，《IEEE量子电子学专题选刊》26，1（2020），会议名称：《IEEE量子电子学专题选刊》。[18] A. Skalli、J. Robertson、D. Owen-Newns、M. Hejda、X. Porte、S. Reitzenstein、A. Hurtado 和 D. Brunner，《利用垂直腔半导体激光器进行光子神经形态计算》，《光学材料快报》12，2395（2022）。[19] A. N. Tait、M. A. Nahmias、B. J. Shastri 和 P. R. Prucnal，《广播与加权：用于可扩展光子尖峰处理的集成网络》，《光波技术杂志》32，4029（2014），会议名称：《光波技术杂志》。[20] A. N. Tait、T. Ferreira de Lima、E. Zhou、A. X. Wu、M. A. Nahmias、B. J. Shastri 和 P. R. Prucnal，《采用硅光子权重库的神经形态光子网络》，《科学报告》7，7430（2017）。[21] A. Hurtado、I. D. Henning 和 M. J. Adams，《利用 1550纳米垂直腔面发射激光器中的偏振切换实现光学神经元》，《光学快报》18，25170（2010），54 次引用（Crossref） [2022-02-13] 出版方：美国光学学会。[22] J. Robertson、T. Deng、J. Javaloyes 和 A. Hurtado，《神经形态光子学中垂直腔面发射激光器尖峰动力学的受控抑制：理论与实验》，《光学快报》42，1560（2017）。[23] J. Robertson、E. Wade 和 A. Hurtado，《超快速率下垂直腔面发射激光器中电控的类神经元尖峰状态》，《IEEE量子电子学专题选刊》25，1（2019）。[24] W. Bogaerts、P. De Heyn、T. Van Vaerenbergh、K. De Vos、S. Kumar Selvaraja、T. Claes、P. Dumon、P. Bienstman、D. Van Thourhout 和 R. Baets，《硅微环谐振器》，《激光与光子学评论》6，47（2012）。[25] C. Xiang、M. L. Davenport、J. B. Khurgin、P. A. Morton 和 J. E. Bowers，《基于氮化硅环形谐振器的低损耗连续可调光学真时延》，《IEEE量子电子学专题选刊》24，1（2018），会议名称：《IEEE量子电子学专题选刊》。[26] H. Larocque、H. Larocque、L. Ranzani、J. Leatham、J. Tate、A. Niechayev、T. Yengst、T. Komljenovic、C. Fodran、D. Smith 和 M. Soltani，《利用超紧凑、低功耗硅谐振器移相器进行波束转向》，《光学快报》27，34639（2019），出版方：Optica 出版集团。[27] D. Liang、G. Kurczveil、Z. Huang、B. Wang、A. Descos、S. Srinivasan、Y. Hu、X. Zeng、W. V. Sorin、S. Cheung、S. Liu、P. Sun、T. V. Vaerenbergh、M. Fiorentino、J. E. Bowers 和 R. G. Beausoleil，《面向下一代高性能计算的集成绿色密集波分复用光子学》，载于 *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020 (2020), paper Th1E.2*（Optica 出版集团，2020）第 Th1E.2 页。[28] T. F. de Lima、H.-T. Peng、A. N. Tait、M. A. Nahmias、H. B. Miller、B. J. Shastri 和 P. R. Prucnal，《神经形态光子学中的机器学习》，《光波技术杂志》37，1515（2019），会议名称：《光波技术杂志》。[29] C. Huang、S. Fujisawa、T. F. de Lima、A. N. Tait、E. C. Blow、Y. Tian、S. Bilodeau、A. Jha、F. Yaman、H.-T. Peng、H. G. Batshon、B. J. Shastri、Y. Inada、T. Wang 和 P. R. Prucnal，《用于光纤非线性补偿的硅光电神经网络》，《自然·电子学》4，837（2021），期号：11，出版方：Nature 出版集团。[30] J. Robertson、E. Wade、Y. Kopp、J. Bueno 和 A. Hurtado，《迈向超快尖峰激光神经元神经形态光子网络》，《IEEE量子电子学专题选刊》26，1（2020）。[31] J. Robertson、M. Hejda、J. Bueno 和 A. Hurtado，《基于尖峰型垂直腔面发射激光器神经元的超快光学集成与模式分类，用于神经形态光子学》，《科学报告》10，6098（2020）。[32] N. Lindenmann、G. Balthasar、D. Hillerkuss、R. Schmogrow、M. Jordan、J. Leuthold、W. Freude 和 C. Koos，《光子线键合：一种用于芯片级互连的新概念》，《光学快报》20，17667（2012），出版方：美国光学学会。[33] M. Blaicher、M. R. Billah、J. Kemal、T. Hoose、P. Marin-Palomo、A. Hofmann、Y. Kutuvantavida、C. Kieninger、P.-I. Dietrich、M. Lauermann、S. Wolf、U. Troppenz、M. Moehrle、F. Merget、S. Skacel、J. Witzens、S. Randel、W. Freude 和 C. Koos，《利用原位三维纳米光刻混合集成组装光通信引擎》，《光：科学与应用》9，71（2020），期号：1，出版方：Nature 出版集团。[34] N. Fang、Z. Yang、A. Wu、J. Chen、M. Zhang、S. Zou 和 X. Wang，《基于（111）绝缘体上硅的三维锥形光斑尺寸转换器》，《IEEE光子技术快报》21，820（2009），会议名称：《IEEE光子技术快报》。[35] M. Pu、L. Liu、H. Ou、K. Yvind 和 J. M. Hvam，《用于绝缘体上硅脊形波导的超低损耗反向锥形耦合器》，《光学通信》283，3678（2010）。[36] M. Hejda、J. Robertson、J. Bueno 和 A. Hurtado，《垂直腔面发射激光器中用于神经形态光子系统的基于尖峰的信息编码》，《物理学杂志：光子学》2，044001（2020），1 次引用（Crossref） [2021-03- 05]。[37] M. Hejda、J. Robertson、J. Bueno、J. A. Alanis 和 A. Hurtado，《利用光子垂直腔面发射激光器神经元将图像像素数据神经形态编码为速率编码光学尖峰序列》，《APL光子学》6，060802（2021）。