
综述：基于VCSEL光子集成器件和系统

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/30899.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！

综述：基于VCSEL光子集成器件和系统。 导读

垂直腔面发射激光器（VCSELs）具有低功耗、低温漂、高调制带宽、易于形成二维阵列等优势，是短距离光互连、三维传感、激光雷达、AR/VR等应用的核心光源。更重要的是，VCSELs平面结构和垂直衬底出射的特点使其成为三维垂直堆叠式集成光子器件和系统的绝佳光源兼集成平台。

近日，中国科学院微电子研究所吴德馨院士团队联合上海理工大学智能科技学院在Light: Science Applications发表了综述文章"Harnessing the Capabilities of VCSELs: Unlocking the Potential for Advanced Integrated Photonic Devices and Systems"。文章第一作者为中国科学院微电子研究所潘冠中青年研究员，通讯作者为中国科学院微电子研究所荀孟青年研究员和上海理工大学智能科技学院董毅博特聘副研究员。

该文回顾了VCSELs的发展历程、发展趋势和存在的挑战，重点探讨了VCSELs在三维光学神经网络、微型涡旋光束发射器、微型全息器件、光束偏转器、微型原子传感器和生物传感器等先进光子集成器件与系统的应用，并论述了VCSELs在集成光子器件和系统中的应用优势及未来的发展趋势和挑战。

概述

垂直腔面发射激光器（VCSEL）具有低功耗、低温漂、高调制带宽、高扩展性、易于片上集成等优势，已成为光子集成领域的核心光源和片上集成平台。尤其VCSEL平面结构和光束垂直衬底出射的特点，使其在三维（3D）垂直堆叠集成方面具有先天优势。近年来，VCSEL为实现微型涡旋光发射器、微型全息器件、微型光束扫描器、生物传感器、微型原子传感系统、3D光学神经网络等先进光子集成器件和系统开辟了全新的路径。作为这些先进集成光子器件和系统的激光光源兼集成平台，VCSEL赋予了它们高集成度、高扩展性、高调制速率和低功耗等优势，为它们在人工智能、大容量光通信、高分辨成像、生物传感等新兴技术领域创造更多的可能性。

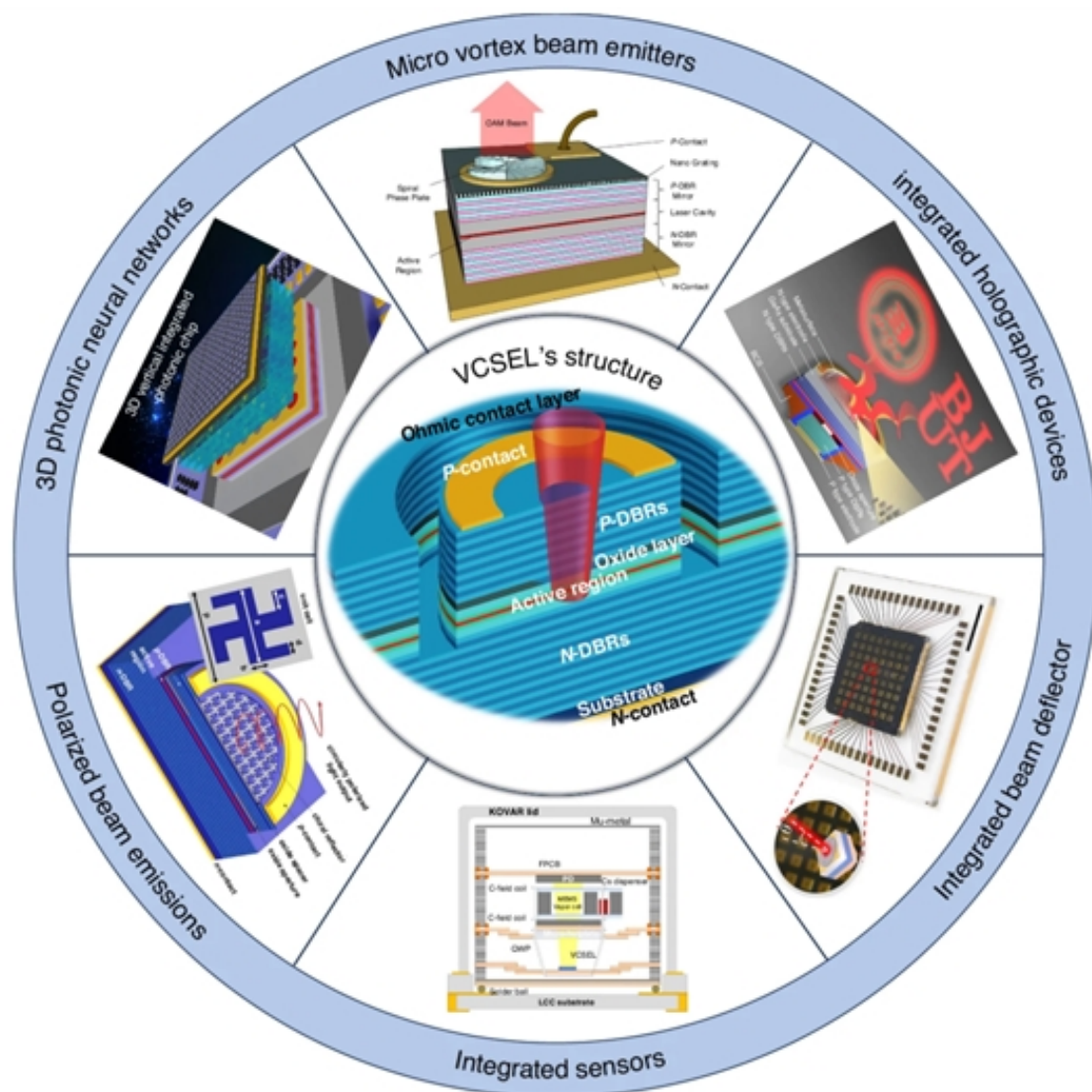


图1：基于VCSEL的先进集成光子器件和系统

基于VCSEL的微型涡旋光发射器件

随着传统光波维度资源（如振幅、波长、相位、时间、偏振）已被开发至接近极限，光通信面临可持续扩容的挑战。涡旋光束的轨道角动量（OAM）具有无穷正交特性，理论上能将光通信容量扩展至无穷，因此，涡旋光通信是解决光通信可持续扩容的有效途径之一。然而，基于空间光调制器（SLM）的涡旋光束产生装置结构复杂、体积庞大，难以微型化和集成化，不利于推广和应用。利用VCSEL平面结构和垂直衬底出射的特点，可直接在其出光孔表面集成微型螺旋相位板、超表面、或叉型光栅等微纳结构，可实现微型、结构紧凑、多通道可扩展的涡旋光发射器件。而且，通过多层相位板级联的方式，可以有效提高空间带宽积，从而实现高拓扑荷数的涡旋光发射器件，为未来大容量光通信应用提供了可供选择的光源。

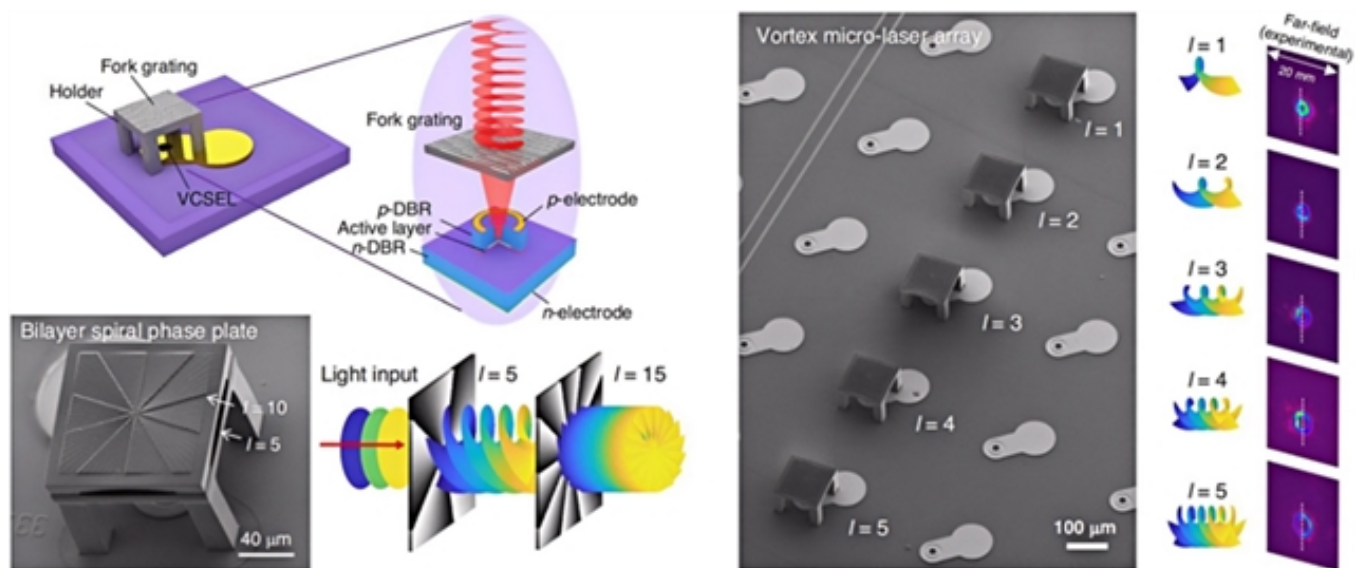


图2：基于VCSEL的集成涡旋光器件和多通道涡旋光阵列

基于VCSEL的微型全息器件

全息技术被认为是未来终极的三维可视化技术。然而，传统的全息成像方法通常使用离散光学元件和片外光源，导致尺寸大，复杂性高。通过将VCSEL与超表面或3D打印全息相位板集成，可以实现芯片级的全息器件。此外，通过将由二维双折射纳米天线阵列组成的超表面与VCSEL相结合，可以实现偏振复用全息成像。这种多路复用技术可以大幅提升信息传输能力，在光通信、显示、数据存储和光加密等领域具有重要的应用价值。

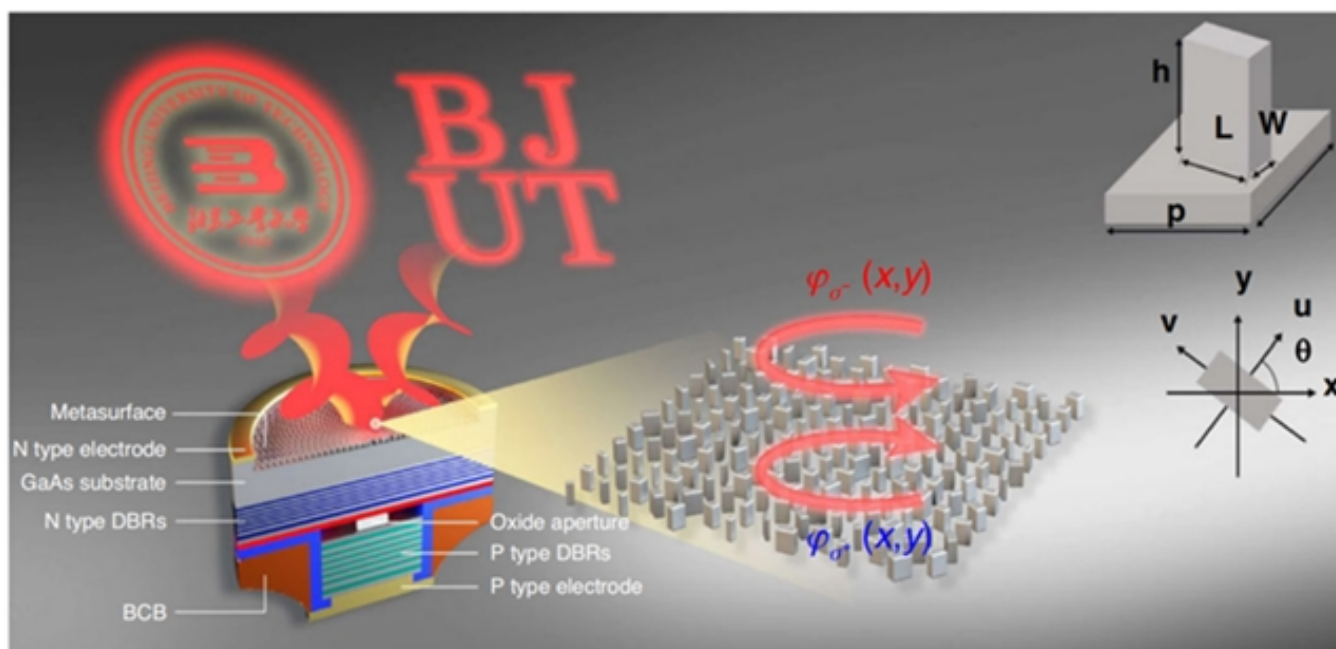


图3：基于VCSEL的微型全息器件

基于VCSEL的原子传感系统

原子精密传感系统，如原子钟、原子磁力仪和原子陀螺仪，依靠激光和原子之间的相互作用来实现对时间、磁场和姿态的精确测量，由于其特殊的精度和灵敏度，在各种科学和工业应用中发挥着至关重要的作用。原子传感系统正朝着微型化、集成化的方向发展，这有助于集成到紧凑的电子设备和系统中。芯片级的原子传感系统因其尺寸小、功耗低、稳定性好等优点而具有高度的吸引力。然而，传统的固体/气体激光器并不适合实现芯片级的原子传感器。相比之下，具有单模、窄线宽、偏振稳定的VCSEL已被证明是实现微型原子传感系统的绝佳光源，封装后的原子钟系统外部尺寸为15mm×15mm×13mm，可与5欧分硬币相媲美。

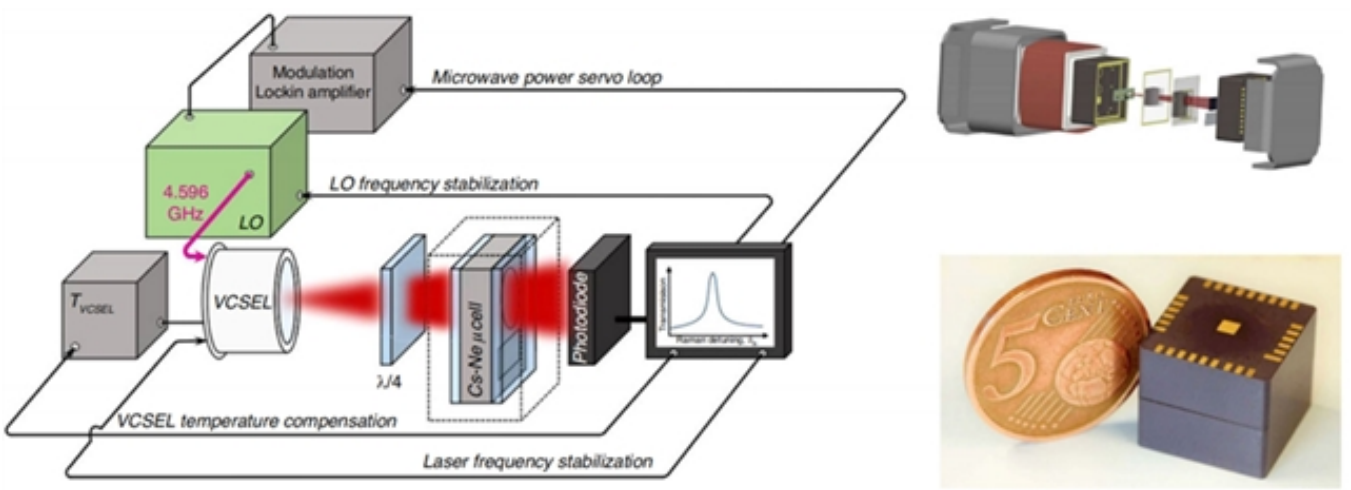


图4：基于VCSEL的微型原子钟

基于VCSEL的光学神经网络

随着人工智能大模型的不断涌现，现有冯诺依曼架构计算系统的算力不足、高能耗问题逐渐凸显。光学神经网络（PNNs）模拟人脑的运算架构，以光作为信息载体，展现出了超快的计算速度和超低能耗的优势。目前，PNNs除了以硅光子技术实现的二维架构外，还发展出了三维空间的计算架构。光可以在自由空间中传播的特性使得三维PNNs的构建无需复杂的互联光路，简化了实现难度。VCSEL的二维阵列、高速、非线性等特性使得它在三维PNNs中发挥了重要作用。大体可以总结为：（1）VCSEL作为有源器件可以被光泵浦，并且VCSEL的泵浦响应可以通过多种手段进行调制，因而，VCSEL可以作为光子神经元实现权重功能。（2）VCSEL的光泵浦过程展现出了较强的非线性过程，因而可以用于构建神经网络中的非线性激活函数。（3）作为激光源，VCSEL具有极高的调制速率，因而可以用于PNNs的高通量光信号输入。（4）在超导和量子计算中，低温环境通常是必须的，VCSEL能够用于从超低温到室温的数据传输。后续，在本节中，作者深入总结了基于VCSEL构建的深度神经网络、脉冲神经网络、储备池计算、衍射神经网络等三维光学神经网络架构。

图5：基于VCSEL的三维光芯片架构

总结

本文综述了基于VCSEL的集成光子器件和系统的最新发展，包括光子神经网络、涡旋光束发射器、全息器件、光束偏转器、原子传感器和生物传感器。这些基于VCSEL的先进光子集成器件和系统具有小尺寸、低功耗、可扩展、易装配等优势，在人工智能、大容量光通信、原子精密传感、生物传感等领域表现出很强的吸引力。总之，VCSEL在集成光子领域中发挥着关键作用，在推进该领域走向高效、紧凑和多功能的光子解决方案有着重要意义。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01561-8>

作者：吴德馨等 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