

面向芯片化量子精密测量的1MHz窄线宽VCSEL激光器

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41089.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！

面向芯片化量子精密测量的1MHz窄线宽VCSEL激光器。 导读

近日，电子科技大学巫江教授、任翱博研究员团队通过单片集成无源腔结构，成功研制出线宽窄至1MHz的拓展腔架构垂直腔面发射激光器（VCSEL），在保证单纵模的条件下，有效延长了有效光子寿命，同时抑制了高阶横模，无需外部光学反馈即实现稳定单模输出，为下一代集成化量子传感与计时系统提供了关键光源解决方案。

相关成果以1-MHz Linewidth VCSEL Enabled by Monolithically Integrated Passive Cavity for High-Stability Chip-Scale Atomic Clocks为题发表于Light: Science Applications。论文通讯作者为巫江教授、任翱博研究员、王昊博士，第一作者为博士生唐枝婷。

垂直腔面发射激光器（VCSEL）的线宽直接影响芯片级原子钟的稳定性和授时精度。线宽的产生主要受到激光器激发态的自发辐射、相位噪声、外界因素（如谐振腔机械振动和温度抖动）等影响。线宽越小，意味着激光的光谱纯净度越高，即单色性越好。为了实现小线宽，VCSEL需要具备极低的相位或频率噪声和相对强度噪声。然而，由于激光器工作物质的固有增益限制，依靠传统谐振腔几乎无法直接实现窄线宽输出。尽管以外腔反馈和自注入锁定等方法能够压缩线宽至亚兆赫兹水平，但依赖外部谐振器的方式增加了系统的复杂性、体积和成本，难以满足高集成度系统的要求，同时限制了与芯片级原子钟、光学陀螺仪、量子磁力仪等实际应用。VCSEL凭借其低阈值电流、低发散角、易集成等优势，成为量子系统的理想选择。然而，由于其固有短腔结构导致光子寿命有限，典型线宽高达20-50

MHz，难以满足目前芯片化量子精密测量系统对激光器光谱纯度和频率稳定度的要求。

针对这一挑战，研究团队提出了一种单片集成无源腔的VCSEL架构，通过将本来集中于有源区的光场重新分布至低损耗的无源腔区域，在保证单纵模的条件下，有效延长了有效光子寿命，同时抑制了高阶横模，在无需外部反馈的条件下实现线宽的大幅压窄和稳定单模输出。

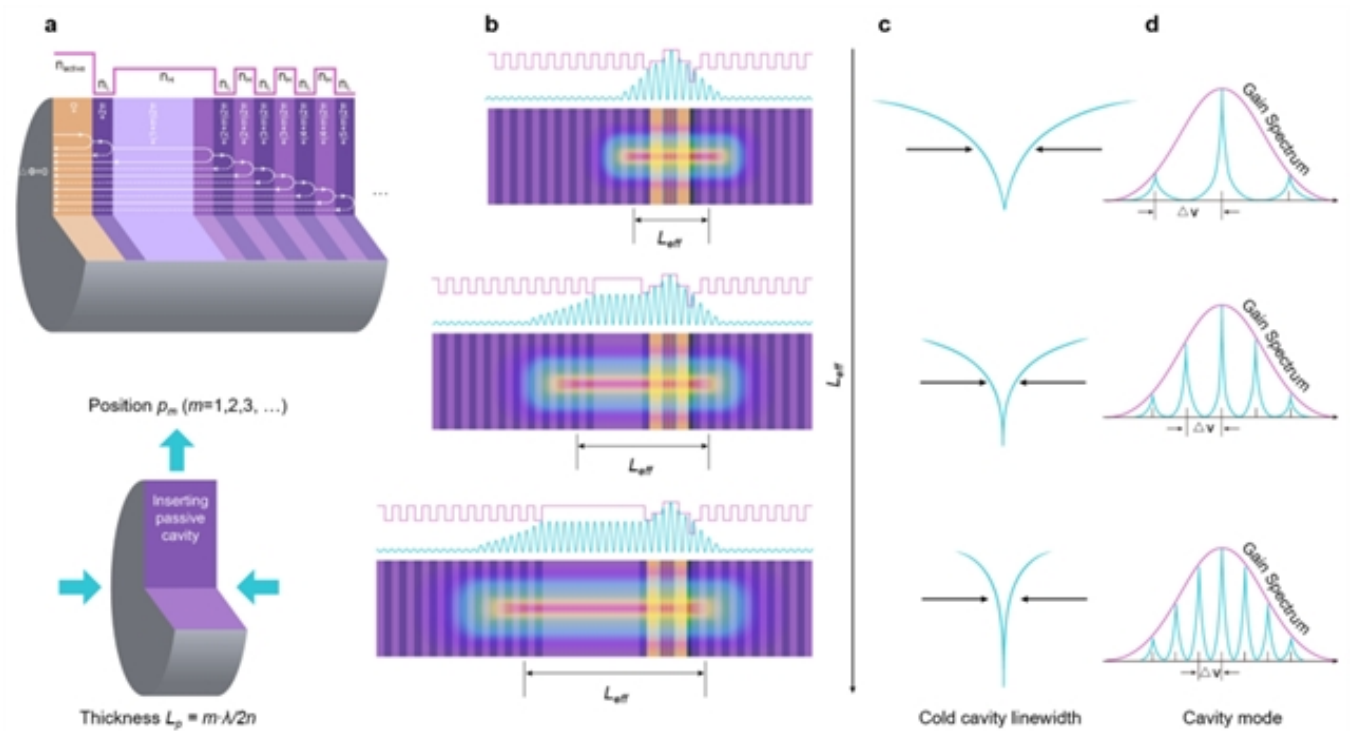


图1: VCSEL中光学模体积的重新分配原理及其模式权衡。(a)单片集成的有源-无源腔VCSEL示意图；(b-d)无源腔长度对有效腔长、冷腔线宽及相邻纵向模式的影响

研究团队首先通过模式理论研究并绘制了无源腔插层位置 (P_m) 与拓展长度 (L_p) 对器件有效腔长 (L_{eff})、相邻纵向模式 (FSR) 以及模场分布的构效关系 (图1a)。研究发现, 在有源区光场衰减至其 $1/e$ 域值前的分布式布拉格反射镜 (DBR) 内插入无源腔可以有效延长谐振腔系统的有效腔长且压窄线宽, 但与此同时也会减小FSR, 进而加剧纵模竞争 (图1b-d)。通过协同权衡, 最终得到了在 $P_m=1$ 处嵌入 $L_p=4.5\lambda$ 无源腔架构, 在有效压缩线宽的同时, 确保了足够的纵模间隔以维持稳定的单纵模输出能力。

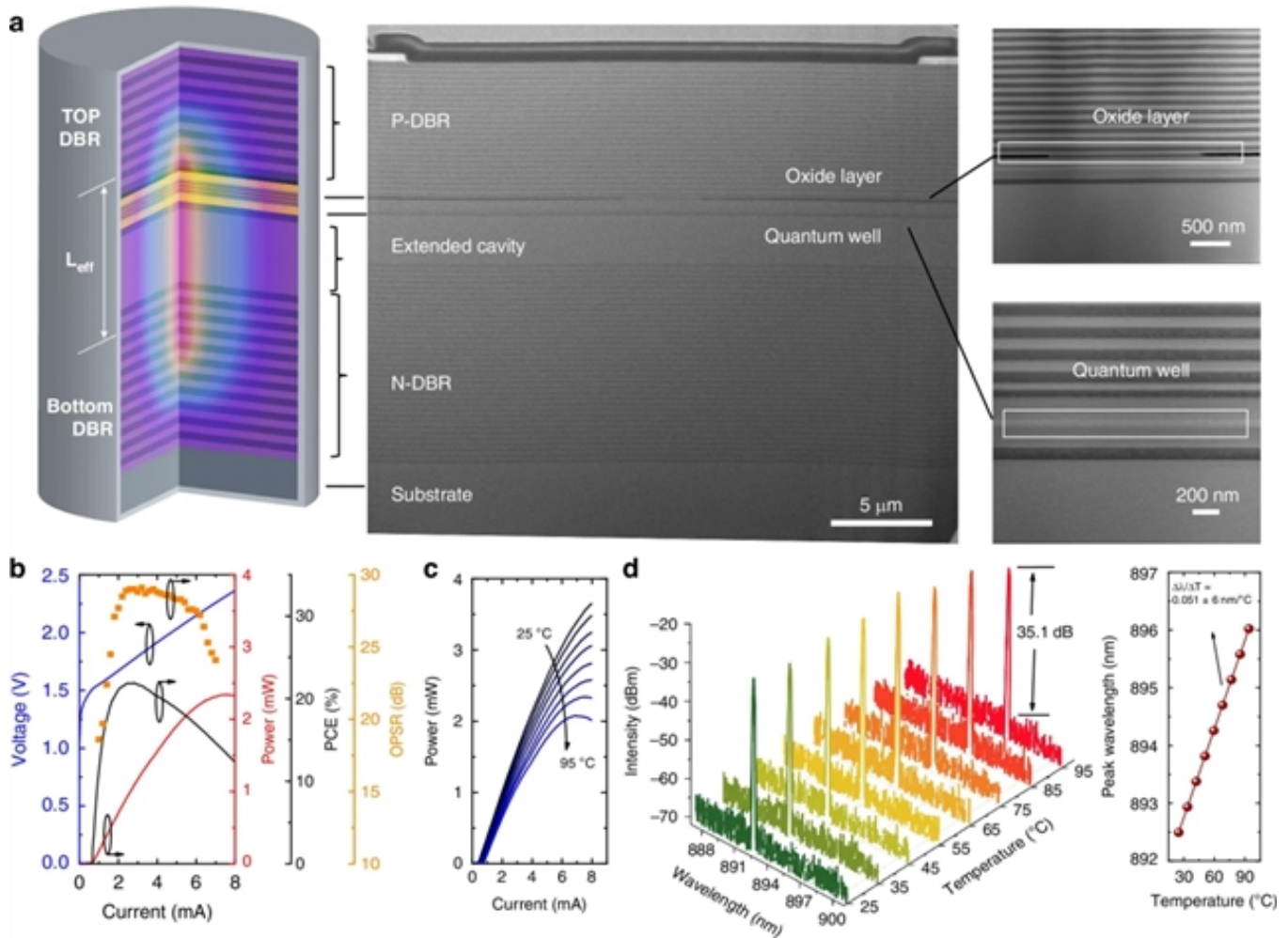


图2: 器件结构及光电性能。(a)器件外延结构示意图及对应的横截面扫描电子显微镜图, 包含n型DBR、无源腔、有源区量子阱、氧化层和p型DBR; (b)在85 °C下测量的VCSEL的L-I-V-OPSR特性; (c)在不同温度(25 °C至95 °C)下测量的L-I曲线; (d)在不同温度(25 °C至95 °C)下, 在固定注入电流1.4 mA下测量的发射光谱。插图显示了波长偏移($\Delta\lambda/\Delta T$), 随着环境温度的升高, 展现出0.05 nm/°C的线性波长红移

VCSEL器件采用标准MOCVD外延和III-V

晶圆加工工艺制造。图2a展示了器件的DBR、有源区、无源腔以及带有3.5 μm 氧化孔的关键功能区域。图2b展示了该器件的光电流-电压(L-I-V)特性、功率转换效率(PCE)和正交偏振抑制比(OPSR)。该器件在85 °C下展现出低阈值电流0.76 mA, 最大输出功率2.2 mW, 峰值PCE为20%, 且OPSR超过25 dB。图2c的L-I特性和PCE曲线表明, 在25 °C至95 °C的温度范围内, 输出功率仅出现轻微的热滚降。图2d展示了在1.4 mA恒定注入电流下, 不同温度下的发射光谱。该器件在高达95 °C的温度下仍能保持稳定的单模输出, 且保持了35.1 dB的高边模抑制比(SMSR)。在75 °C和1.4 mA注入电流下实现了与铯D1跃迁线(894.6 nm)对准, 同时SMSR超过40 dB, OPSR超过29 dB。

在光谱噪声与频率稳定性方面, 研究团队通过零差法噪声测试系统(图3a)测试了VCSEL频率噪声功率谱密度(PSD)。结果显示, 在1.4 mA电流下, 器件在高频区呈现稳定白噪声水平($\sim 2.3 \times 10^5 \text{ Hz}^2/\text{Hz}$), 对应的洛伦兹线宽约1 MHz, 且在25 °C至95 °C温区内保持稳定(图3b)。

与相同波长（894.6 nm）已报到的VCSEL、DFB、ECDL激光器相比，该器件的线宽与频率噪声性能均处于领先或相当水平。为验证其在实际系统中的性能，研究团队将VCSEL集成于铯蒸气室相干布局囚禁（CPT）原子钟测试平台（图3c）。Allan偏差测量结果表明，该原子钟的短期稳定性呈现出 $\tau^{-1/2}$ 的典型白噪声特性，在1秒积分时间内稳定性达 $2 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ ，并在300秒处达到最低Allan偏差 $1.89 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ （图3d），从系统层面验证了该窄线宽VCSEL在芯片级原子钟系统中的应用潜力。

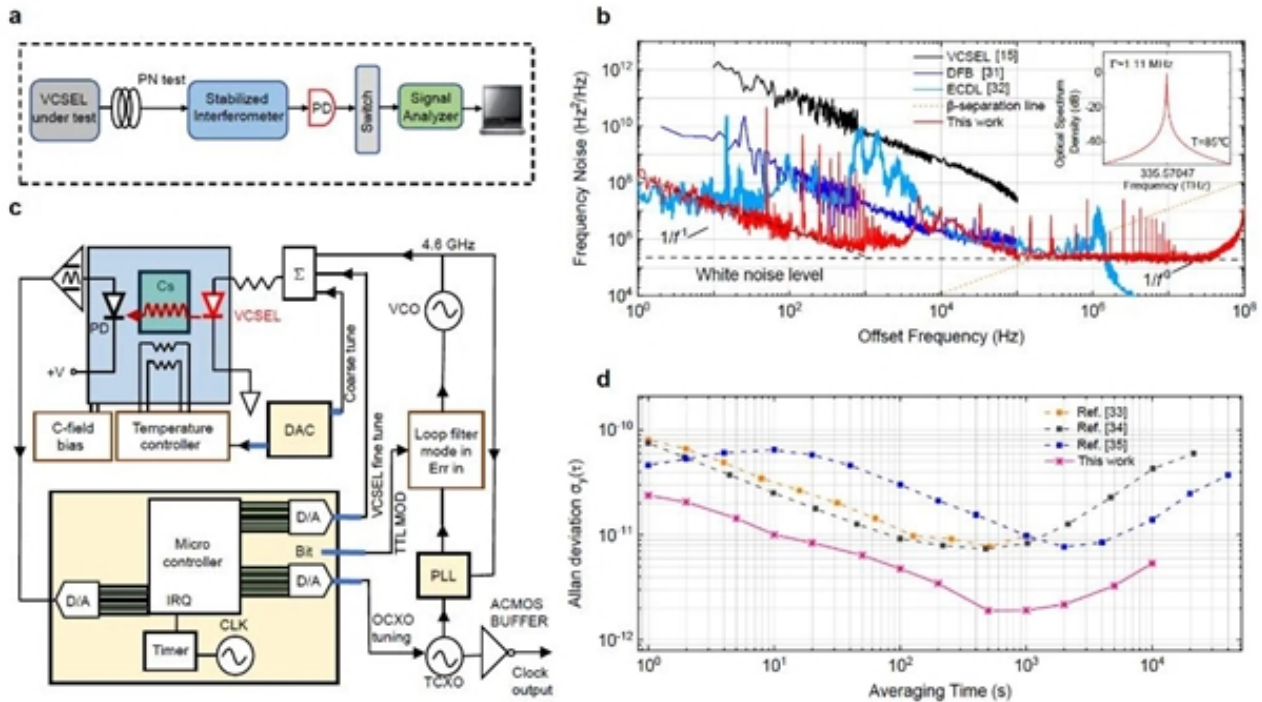


图3：频率噪声特性与原子钟系统验证。(a)频率噪声测试系统示意图；(b)VCSEL频率噪声功率谱密度及洛伦兹线宽拟合；(c)基于VCSEL光源的铯原子钟系统示意图；(d)原子钟系统Allan偏差偏差测量结果

总结与展望

本研究设计并实验验证了一种基于单片集成无源腔的窄线宽VCSEL架构。该器件在894.6 nm（Cs D1线）波长处实现了约1 MHz窄线宽单模输出，同时保证了超过35 dB的边模抑制比、超过25 dB的正交偏振抑制比和7.0°的低光束发散角。该成果为解决芯片级原子钟及量子传感器对高性能、高集成度光源的需求提供了切实可行的技术方案，有望推动精密计时、导航与量子计量等领域的下一代集成化平台发展。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02192-x>

作者：巫江等 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