
利用腔体几何重塑 VCSEL 光特性

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37394.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！

利用腔体几何重塑 VCSEL 光特性。 导读

自20世纪90年代垂直腔面发射激光器（VCSEL）商业化以来，这类激光器以其低功耗、易于集成、面阵封装等优势广泛应用于数据通信、面部识别、激光雷达、近红外成像等关键领域。然而，经典的圆形VCSEL结构在发光功率、空间相干性与偏振稳定性等方面仍被少量模式限制，缺乏调控空间，制约其在高性能与多功能集成光源中的进一步拓展。

近日，阿卜杜拉国王科技大学（KAUST）Boon Ooi 教授团队系统探索了腔体几何对VCSEL光学性能的调控作用。团队基于标准制程，设计并制造了五种横向腔体形状（圆形、方形、D形、蘑菇形、五边形）的宽腔VCSEL阵列，全面表征了其静态与动态发射特性，包括光功率、多模分布、远场图样、空间相干性与偏振行为。这项工作提出了一种无需更改工艺、通过几何工程实现VCSEL性能跃迁的通用策略，为面向不同应用需求（如通信、成像、传感与光源）设计高性能定制化激光器提供了创新思路与实验支撑，推动VCSEL从单一光源向多功能光子引擎的转变。

该成果以Shaping the Light of VCSELs through Cavity Geometry Design为题发表在国际顶尖光学期刊《Light：Science Applications》。

研究背景

VCSEL（垂直腔面发射激光器）是现代光子芯片和光电系统中的关键器件，广泛用于高速数据通信、3D 结构光成像、激光雷达、近红外识别以及物理随机数生成等新兴场景。相较于边发射激光器，VCSEL具备低成本、可阵列封装、垂直面发射，便于阵列集成等优势，推动其大规模商业化。然而，传统 VCSEL 多采用对称的圆形腔体，其空间模态与增益分布受限于旋转对称的圆形边界条件，导致模式数量少、增益利用率有限、偏振与相干性难以调控，从而制约其在高功率、高稳定性和低相干等特殊光源需求中的进一步拓展。尽管已有部分研究尝试通过工艺调整或材料优化改善性能，但谐振腔体形状这一最基本的设计维度在 VCSEL

中尚未得到充分探索。为此，Boon Ooi 教授团队提出并实践了一种腔体几何调控新策略，通过设计五边形、蘑菇形、D形等非对称横向腔体结构，在不改变芯片制程与工艺的前提下，显著改善了 VCSEL 的输出功率、控制了多模激射行为。并通过一系列实验探究了其远场图样、空间相干性和偏振动态等关键指标，为下一代功能可编程光源提供了可行性验证和理论依据。

研究亮点

1、腔体几何打破对称性，实现功率与效率跃迁

本研究通过在同一片商用940 nm VCSEL晶圆上同时集成不同几何腔体的宽腔 VCSEL，系统对比了五种具有不同几何轮廓的宽腔 VCSEL 器件（圆形O-VCSEL、方形S-VCSEL、D形D-VCSEL、蘑菇形M-VCSEL、五边形P-VCSEL）（图1），揭示了腔体形状对激光器多项关键性能指标的深度影响，涵盖光输出功率、单位面积功率密度、阈值电流以及斜率效率等。

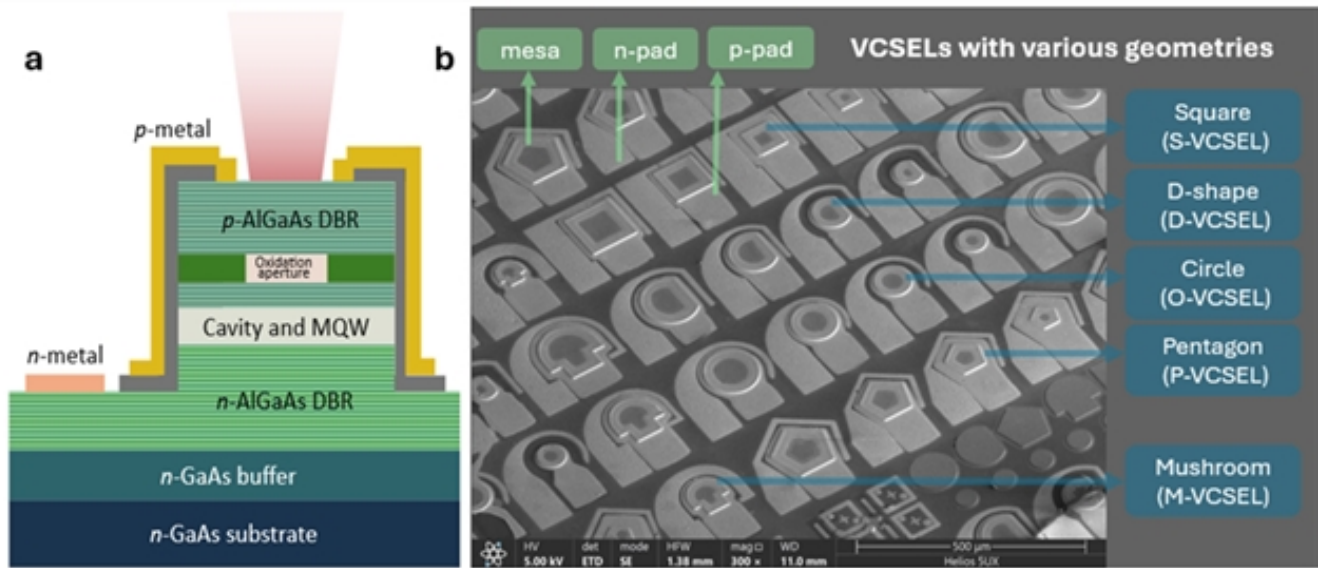


图1. VCSEL结构与光功率测量示意图。(a) 940 nm VCSEL的剖面结构示意图；(b) 扫描电子显微镜（SEM）图像展示了的五种不同腔体几何形状：正方形、D形、圆形、五边形与蘑菇形。

结果显示，腔体几何不仅决定激光模式分布和增益利用效率，还能显著提升器件整体性能与能效表现。其中，五边形 VCSEL 表现最为优异，实现最高单位面积功率密度，较圆形提升约103%（图2）。Q-factor 分布模拟结果揭示了激光器内部模态竞争机制的几何差异性。圆形 VCSEL 拥有少数极高 Q-factor 的模式，导致这些高Q-factor的模式以低阈值优先激射，消耗注入能量，阻止其他拥有低Q-factor的模式成功激射，限制最终输出的模式数量，进而抑制多模共振。且圆形腔体带来的连续边界条件支持的本征解为WGM模式，其空间分布在腔体边缘，导致中心区域难以激发，整体增益利用率偏低，而D形与五边形VCSEL Q-factor分布均匀，可支持更多模态同时起振，从而缓解模式抑制现象，利于实现高功率输出与稳定的多模共存。

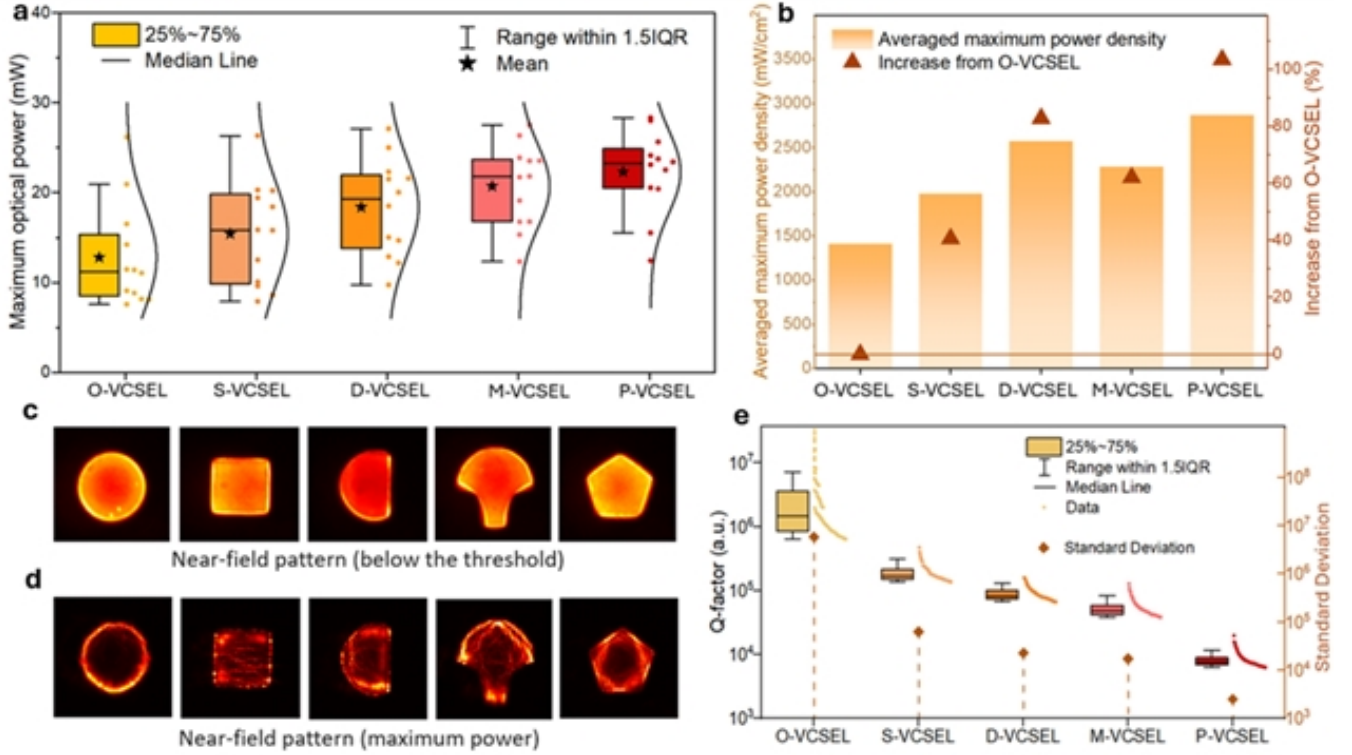


图2. 不同几何腔体 VCSEL 的电学与光学特性。(a) 不同腔体形状 VCSEL 的最大光功率分布；(b) 不同几何结构 VCSEL 的平均最大功率密度条形图 (mW/cm^2)，并以圆形腔体 (O-VCSEL) 为基准归一化；(c) 各腔体结构在激光阈值电流以下的近场图 (NFP)；(d) 各腔体结构在最大输出功率下的近场图；(e) 不同几何结构下前 100 阶最高 Q-factor 排列的模式分布，数据来源于无源腔体模拟。

2、腔体几何决定调控模态复杂性与空间相干性，为低斑点照明与多通道通信提供解决方案

除了提升功率与效率，腔体几何结构还深刻影响 VCSEL 的模态结构、发散角分布以及空间相干性等关键发光特性，这对高质量成像、斑点噪声抑制及多通道光通信具有重要意义。研究发现，五边形 VCSEL 的远场图中高频特征最为强烈，其模态最复杂，空间相干性最低。研究团队在相同曝光条件下对比不同 VCSEL 的成像性能（图3）。结果显示，圆形与方形 VCSEL 在图像中出现明显 speckle 噪声；而 D 形、蘑菇形与五边形 VCSEL 成像更清晰，背景平滑。这种通过几何轮廓调控来实现低相干多模激光发射的策略，可显著改善传统 VCSEL 在成像与照明中的 speckle 问题，为构建高亮度、低功耗、易集成的 speckle-free 光源系统提供了全新解决路径，适用于 AR/VR 显示、生物医学成像、3D 结构光传感等重要应用场景。

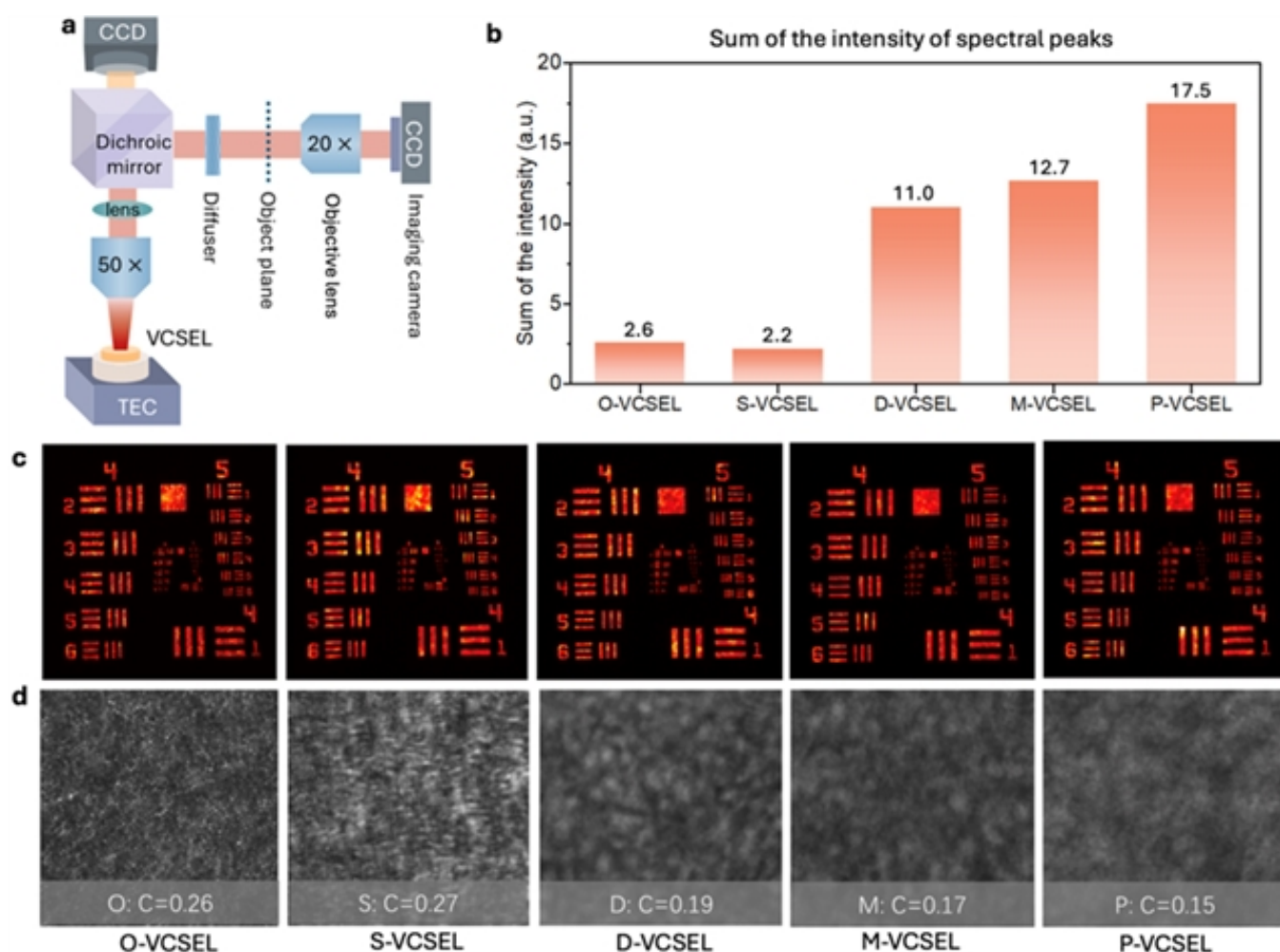


图3. 不同腔体结构 VCSEL 的空间相干性分析与 speckle 表征。(a) 照明性能评估的实验搭建示意图；(b) 不同几何结构 VCSEL 的光谱中各强度峰值之和；(c) 不同结构 VCSEL 照明下图卡的成像图像；(d) 对应成像图像的噪点图与其对比度。

3、几何腔体增强偏振控制，调节激光动态行为

偏振稳定性与动态响应是决定 VCSEL

能否用于高速通信、精密传感及随机数生成等应用的关键因素。本研究通过对不同几何形状 VCSEL 的偏振响应与射频频谱特性（图4）进行分析，发现腔体几何不仅能调控激光器的静态发射属性，还能精准干预其偏振行为与动态稳定性。通过计算正交偏振抑制比发现，D-VCSEL 与 M-VCSEL 显著优于其他结构，在主偏振方向上的输出远高于正交方向，表现出良好的偏振保持能力。这种几何诱导的偏振控制能力有助于抑制偏振翻转和模式干扰，在高速通信与偏振敏感成像中具有重要应用价值。

在动态特性方面，D形VCSEL 与

蘑菇形VCSEL表现出最低的射频能量，代表其输出激光稳定性最高。相反，五边形VCSEL 与正方形VCSEL 由于缺乏偏振约束，展现出丰富的频谱成分，代表存在剧烈模式耦合与偏振跃迁。虽然偏振波动与射频丰富性在传统应用中被视为不稳定因素，但对于物理随机数生成与光子 reservoir computing 而言，却是非线性动态资源。其中，五边形VCSEL展现出高度多模耦合与偏振模态混叠特性，是构建高熵源、模拟神经元多稳态行为、执行组合优化问题的理想平台。简单的

几何腔体调控为激光器从静态特性优化向动态调谐提供了可能性，既可用于构建稳定通信光源，也可支撑混沌态激光应用。

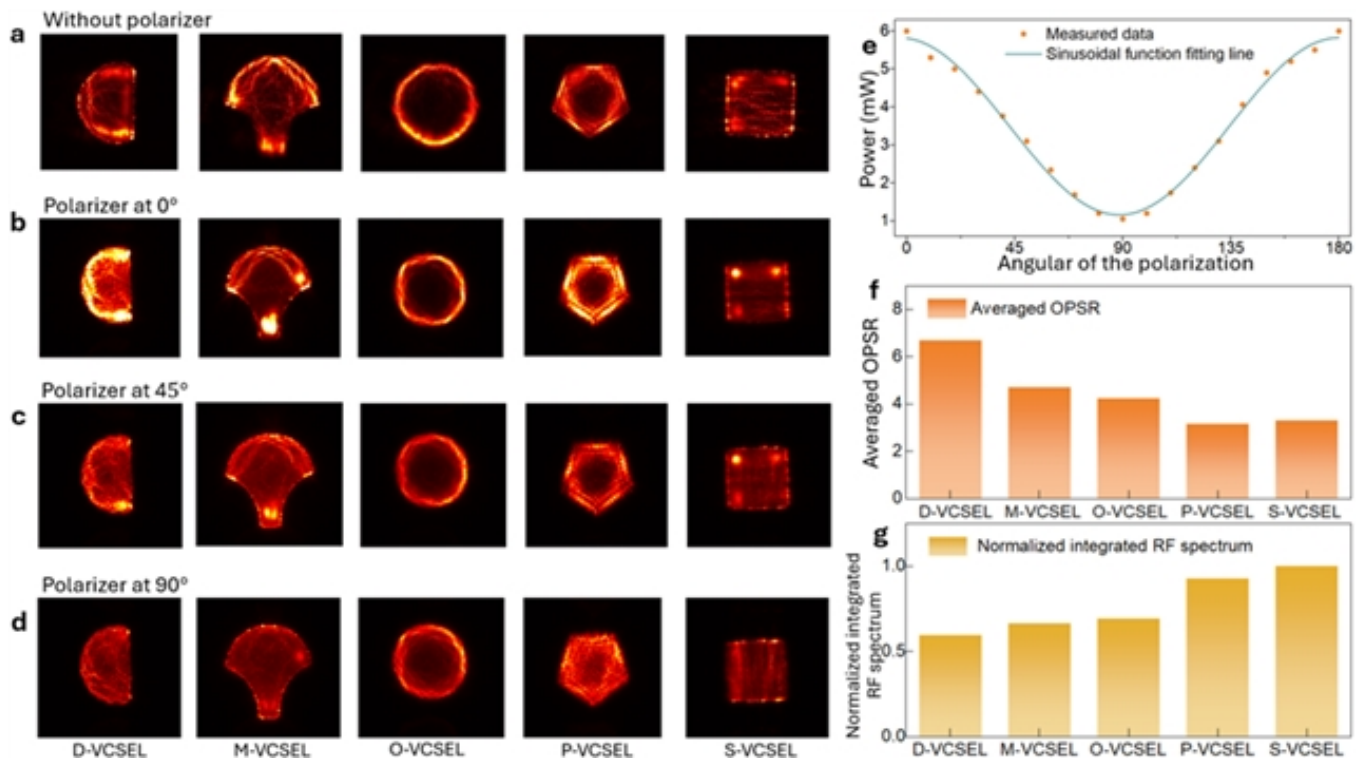


图4. 不同腔体几何结构 VCSEL 的偏振响应与射频光谱特性。(a – d) 不同 VCSEL 在 a. 无偏振片及偏振片旋转至 b) 0°、c) 45°、d) 90° 角度下的近场发射图。(e) VCSEL 沿不同偏振角度的光功率响应曲线，呈现与晶格方向相关的偏振优选行为；f：各几何结构器件的正交偏振抑制比（OPSR）平均值。(g) 不同 VCSEL 在最大功率下、无偏振选择条件下测得的归一化积分射频光谱强度，反映其发光强度时间稳定性。

总结与展望

本研究系统揭示了腔体几何结构对宽腔 VCSEL 发光性能的多维调控机制。从静态参数如输出功率、阈值电流、功率密度，斜率效率，光谱展宽与空间相干性到动态行为，如多模演化与偏振稳定性，研究构建了一套几何腔体到多模激射调控的系统映射关系。通过设计圆形、方形、D形、蘑菇形、五边形等典型非圆对称结构，研究团队在不影响通用 VCSEL 材料和工艺改进的前提下，实现了对激光器关键性能的结构化调控，充分展现了几何设计在光源工程中的巨大潜力。

本工作的意义不仅在于验证了几何结构作为 VCSEL 性能调控工具的可行性，更重要的是，它为光源设计引入了腔体调节的新维度。未来，研究者可进一步结合亚波长结构、二维光子晶体、集成多阵列方案，推动 VCSEL 向高功率、低相干、多功能、多通道的新一代光源方向发展。面向应用前景，本研究成果为 AR/VR 显示、三维结构光测量、生物成像、车载激光照明、随机数生成与光子计算等多个领域的光源模块提供了新的光源可能性，为构建面向下一代信息系统的智能光源奠定了坚实基础。（来源：LightScienceApplications 微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01996-7>

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：Boon Ooi 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