
高性能胶体量子点面发射激光器阵列

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/31923.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！

高性能胶体量子点面发射激光器阵列。导读

胶体量子点（CQD）作为一类新型激光增益介质，具有低增益阈值、发光波段覆盖完整且灵活可调、溶液法制备成本低、制备工艺兼容等优势，有望为非外延式半导体激光器的发展注入新的动力。在通信、传感、显示等诸多领域中，面发射激光器以其窄发散角、高光效和易于二维阵列化集成等优点，应用价值已获广泛验证，应用场景正不断拓展。因此，通过开发基于CQD的面发射激光器阵列，可集两者之所长，实现低成本、易集成、多波段覆盖的高质量相干光源。

光泵浦CQD激光器是实现未来电泵浦CQD激光器的重要基础，近年来国际上发展较为迅速，但是仍存在以下关键瓶颈：

一，激射阈值较高，且多在飞秒源泵浦下运行。为提升光泵浦CQD激光器的实用价值，需在降低其激射阈值的同时，提高其对相对低成本的皮秒、纳秒乃至（准）连续泵浦源的兼容性。

二，工作稳定性欠佳。较高的激射阈值给CQD材料在激光泵浦下的稳定性提出极大挑战，目前尚未有连续运行10小时以上的CQD激光器报道。

三，集成密度有限。受制于经典的垂直腔面发射激光器（VCSEL）内有限的光场束缚和由此带来的较大模式体积，已报道CQD面发射激光器阵列的集成密度仅为100至300点每英寸（PPI）。

针对上述瓶颈，南方科技大学的王恺教授与孙小卫讲席教授团队联合香港大学Hoi Wai Choi（蔡凯威）教授、深圳技术大学吴丹副教授和苏州星烁纳米王允军博士团队，通过CQD材料和CQD激光微腔两方面的共同改进，开发具有合金化渐变核壳结构的CQD材料，并将之与具有强光场束缚能力的环形布拉格微腔（CBR）结合，构建了兼具低阈值（ $17\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ）、高稳定性（室温连续工作1000小时）和高集成密度（2100点每英寸）等特性的CQD面发射激光器阵列，进一步推动了CQD激光器的发展。

该研究成果以Low-threshold surface-emitting colloidal quantum-dot circular Bragg laser array为题发表在Light: Science

Applications。本文通讯作者为南方科技大学王恺教授和孙小卫讲席教授、香港大学Hoi Wai Choi（蔡凯威）教授和深圳技术大学吴丹副教授，第一作者为南方科技大学-香港大学联合培养博士生谭扬志。

研究背景

低阈值、高稳定性的CQD光学增益是实现高性能CQD激射的必要前提。有鉴于此，研究团队开发了一类基于CdZnSe/ZnSe/Zn_xCd_{1-x}S合金化渐变核壳结构的CQD材料（图1a），通过平滑化CQD内的激子束缚势，抑制了CQD多激子态下的俄歇复合，有助于降低CQD的光学增益阈值并提升其稳定性。基于对CQD二阶微分吸收谱的分析（图1b），观察到了高达147 meV的轻-重空穴能级劈裂，该值显著高于室温下的热能单位（ $kBT \approx 26$ meV），说明CQD中的热致带边能级间跃迁可被有效抑制，有助于提升CQD光学增益的稳定性。在亚纳秒脉冲激光泵浦下，CQD的放大自发辐射阈值仅为 $10 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ （图1c和d），为进一步实现低阈值激射打下良好基础。

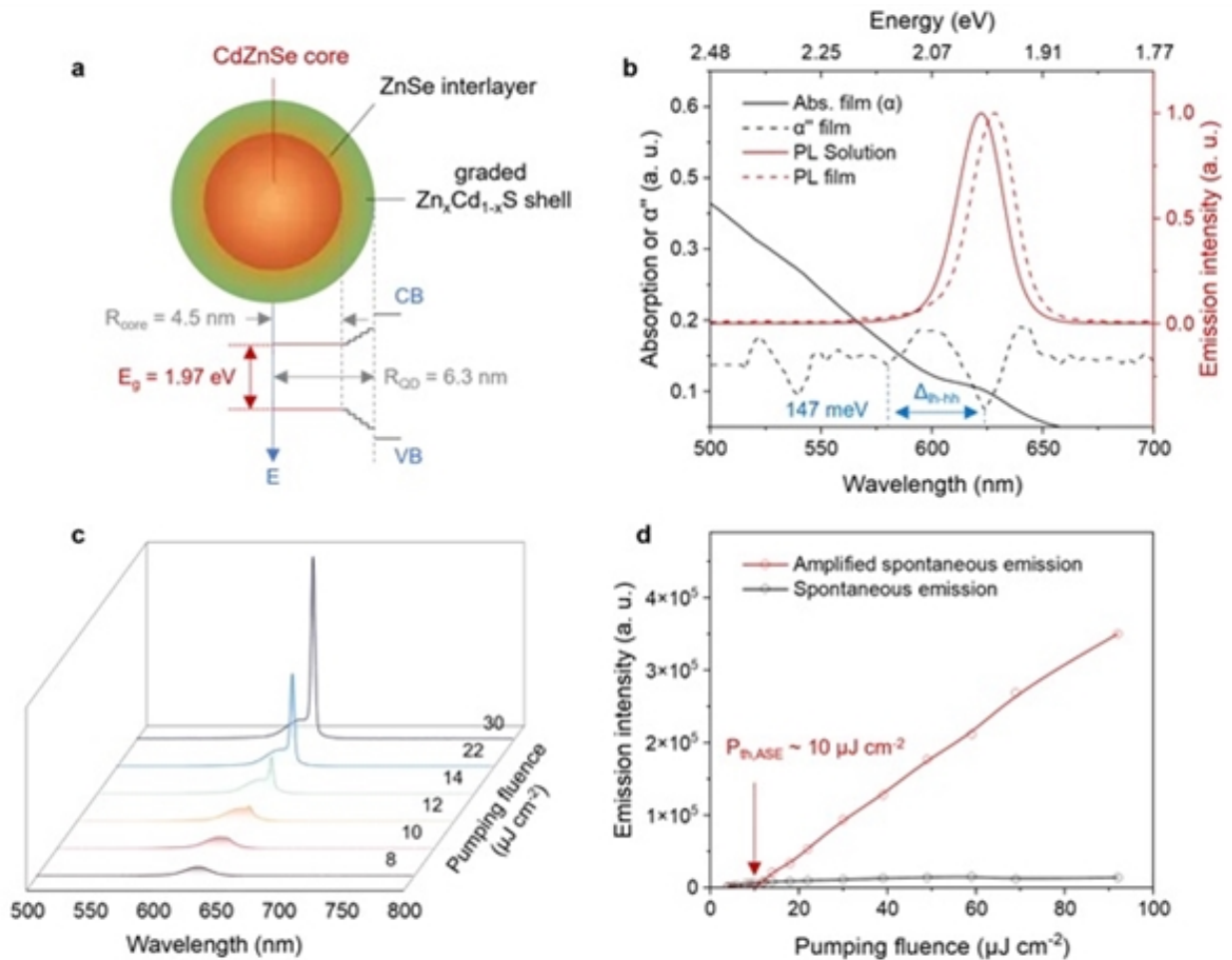


图1. (a) CQD的CdZnSe/ZnSe/Zn_xCd_{1-x}S合金化渐变核壳结构; (b) CQD的光致发光、线性和二阶微分的吸收谱; (c) 变功率的亚纳秒激光泵浦下的CQD的光致发光谱; (d) 与泵浦强度相关的CQD自发辐射与放大自发辐射强度变化曲线。

为实现高性能、高集成度的面发射CQD激光器阵列，需要高效调控CQD激光微腔内的光场分布，以实现：（一）光场与CQD增益介质的有效耦合（以光学束缚因子 Γ 评估）；（二）尽可能强的光场束缚（以模式体积 V 评估）；（三）与CQD增益谱匹配的强珀塞尔效应（以珀塞尔因子 FP 计）。然而，CQD VCSEL作为一类基于一维光子晶体结构的微腔系统，其光场束缚仅在Z轴上较为有效，在上述三点上仍有较大改进空间。因此，研究团队开发了一类CQD CBR激光器，借助在XY平面上的环形布拉格光栅结构，实现了光场束缚由VCSEL的一维（Z轴）到二维（XY平面）的升维（见图2）。在该器件中，CQD不仅扮演着增益介质的角色，还与相对低折射率的氧化硅一起，构建出完整的CBR谐振腔。基于FDTD的数值仿真表明，得益于其高效的光场束缚，

CQD CBR激光腔内的模式体积V相对CQD VCSEL下降了一个量级，光学束缚因子 Γ 和珀塞尔因子FP也得到显著提升（见图2）。

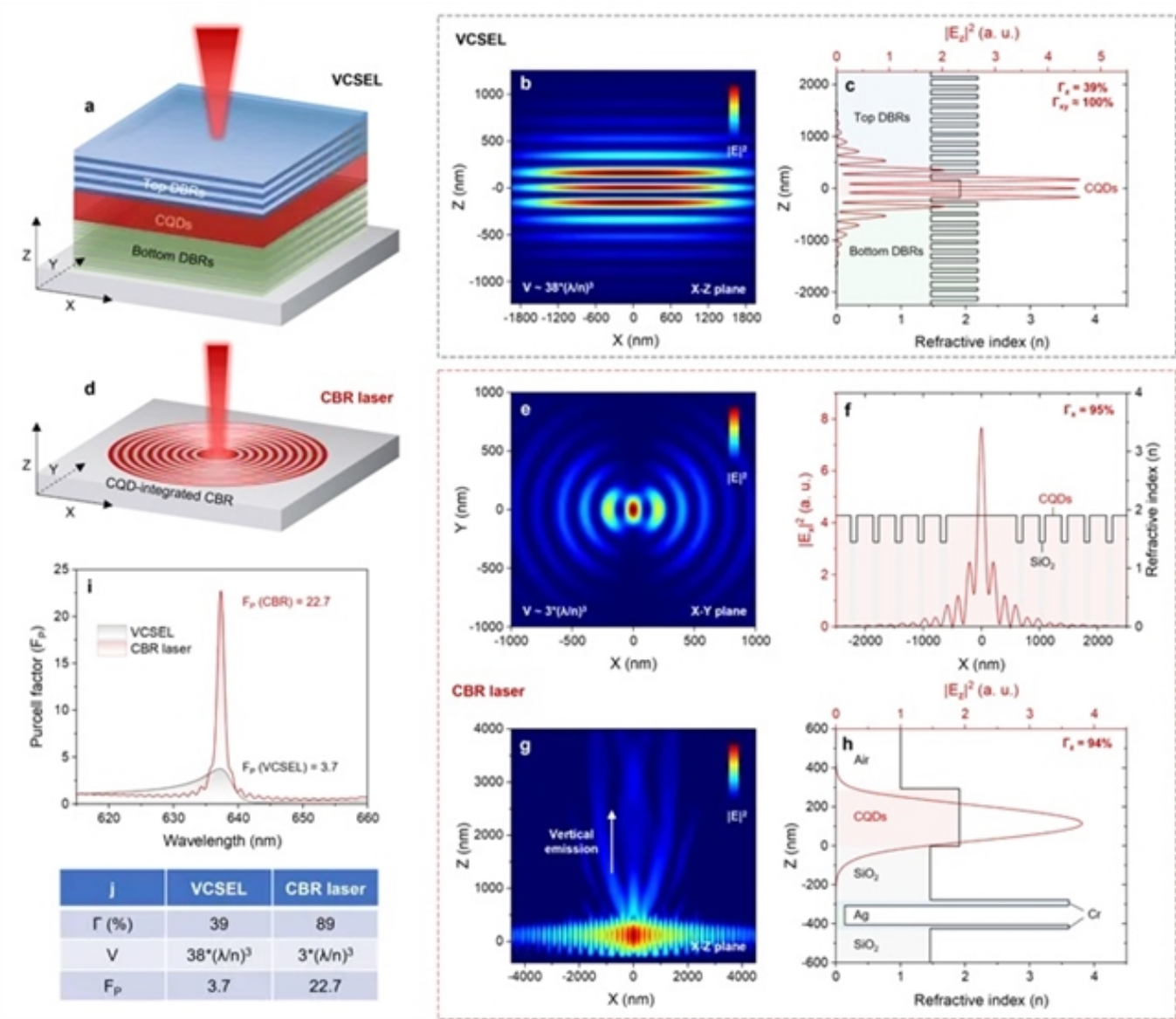


图2. 基于FDTD仿真的CQD VCSEL和CQD CBR激光微腔内光场分布、珀塞尔效应和光学束缚因子的对比。

得益于CBR微腔内光学束缚因子 Γ 和珀塞尔因子FP的大幅提升，在准纳秒（0.3 ns）脉宽的泵浦下，CQD CBR激光器的激光阈值（17 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ）显著低于CQD VCSEL（56 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ），处于已报道的CQD激光中最低阈值之列。同时，由强光场束缚带来的小模式体积V使CQD CBR激光器的高密度阵列化集成成为可能，其集成密度可达2100点每英寸，是当前CQD面发射激光器阵列的最高水平（见图3）。

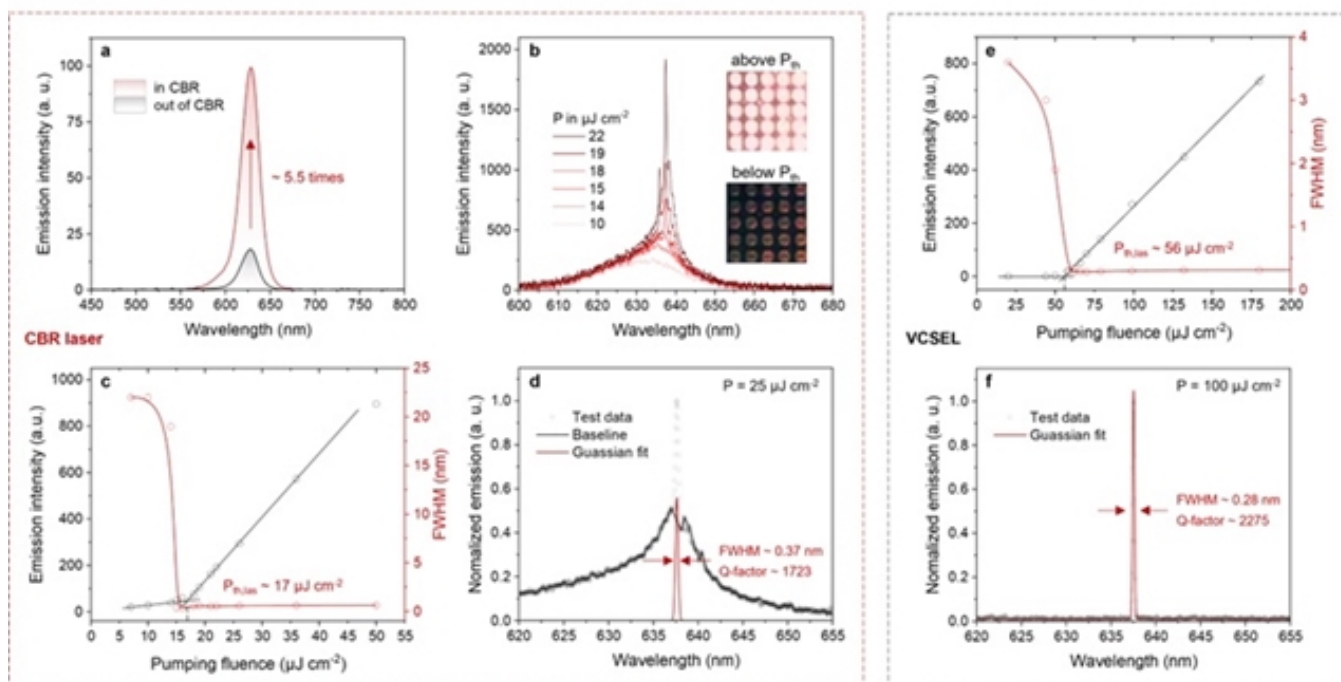


图3. CQD VCSEL和CQD CBR激光器的激光特性对比。

此外，基于高质量的CQD材料与CBR微腔，CQD CBR激光器展现出良好的工作稳定性，其室温连续工作寿命长达1000小时，对应3.6亿次的稳定脉冲激射，两者均为已报道的溶液处理的纳米晶激光器中的最佳值（见图4）。

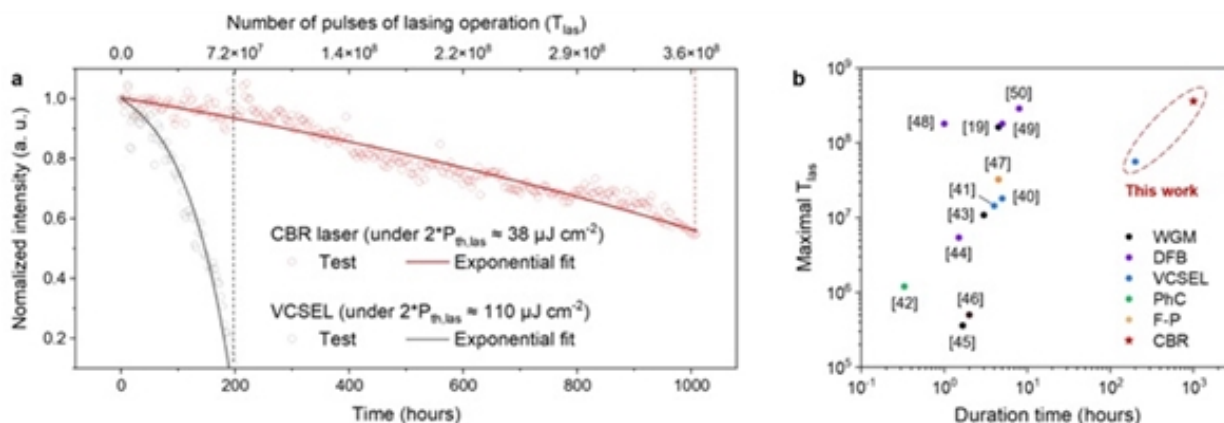


图4. (a) CQD VCSEL和CQD CBR激光器的激光稳定性对比; (b) 已报道的基于溶液处理的纳米晶（CQD和胶体量子阱）激光器的激光稳定性统计，横轴为最大连续工作时间，纵轴为脉冲激射次数。

总结与展望

本工作明确了微腔内的高效光场调控对改善CQD激光特性的作用机制，通过结合高质量的CQD材料与具有强光场束缚的CBR微腔，构建了兼具低阈值、高集成密度、高稳定性的CQD面发射激光器阵列，突破了当前CQD激光器在集成密度与工作稳定性上的技术瓶颈，为进一步实现二极管泵浦乃至电泵浦CQD激射打下良好基础。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01714-9>

作者：王恺等 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