
Light 宽谱有源区技术突破：赋能中红外超宽带半导体激光应用

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42645.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！

Light 宽谱有源区技术突破：赋能中红外超宽带半导体激光应用。 导读

宽光谱中红外量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)是实现宽调谐中红外光源、超短脉冲产生及中红外光学频率梳等前沿应用的关键器件。但通常情况下，红外QCL室温下光谱带宽仅约 100 cm^{-1} ，难以满足多气体同步探测需求。对于级联激光器光频梳而言，较窄的输出光谱也导致载波包络偏移频率锁定困难。受限于有源区能带工程的设计复杂性，当前长波红外单有源区量子级联激光器的电致发光光谱半高全宽(FWHM)普遍低于 500 cm^{-1} （可以实现的光谱宽度远不足 $1\text{ }\mu\text{m}$ ），严重制约了其在宽带光谱调控与精密测量等场景中的应用潜力。目前主流的宽光谱有源区设计方案主要包括双上能级设计(DAU)、束缚态-连续态设计(BTC)以及连续态-连续态设计(CTC)。其中，BTC作为经典设计方案，受限于可利用上能级数量有限，其典型FWHM仅约 300 cm^{-1} ；DAU通过引入多个上能级拓展跃迁通道，在一定程度上将FWHM提升至约 500 cm^{-1} ，但仍受制于跃迁通道数目不足，光谱宽度有限($\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$)；CTC虽进一步缓解了上下能级数量失配问题，却因不同跃迁通道间跃迁矩阵元差异显著，导致增益谱不均匀，其FWHM仅约为 450 cm^{-1} ，光谱宽度提升幅度仍不理想($\sim 0.75\text{ }\mu\text{m}$)。另一类主流策略是采用多有源区垂直堆叠结构，通过集成多个中心波长互补的有源区实现光谱叠加，但该方案易引发阈值电流升高、模式竞争加剧及增益非均匀分布等问题，难以获得平坦、连续且高功率的宽光谱输出。综上，发展兼具大光谱宽度、高增益均匀性的新型中红外单有源区量子级联激光器结构，已成为该领域亟待突破的关键科学问题。

该研究成果近日发表于国际顶级学术期刊《Light: Science Applications》，题为 Ultra-broadband single-stack mid-infrared semiconductor lasers grown by MOCVD。

研究内容

本研究团队提出了一种基于对角跃迁的多能态-连续态(MTC)有源区设计方案，该结构采用应力补偿材料体系构建。如图1所示，经优化设计后，两个注入区能级(4和6)与有源区的上激光能级5形成了强耦合。电子可通过三个上激光能级(4-6)向下激光能级(1-3)进行对角跃迁，多个跃迁通道同时贡献增益，显著拓宽了有源区的增益带宽。

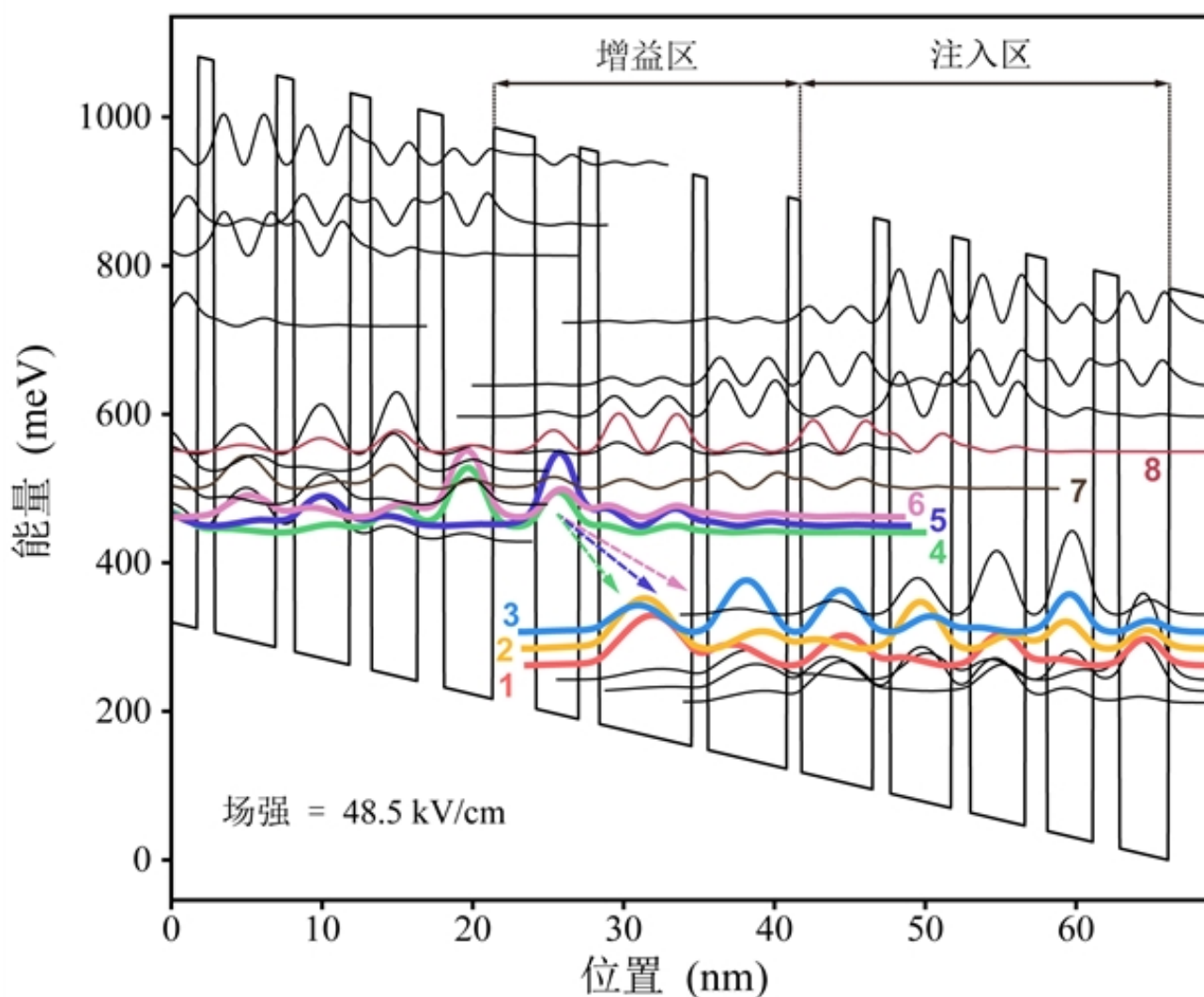


图1. 基于 $\text{In}_{0.593}\text{Ga}_{0.407}\text{As}/\text{In}_{0.362}\text{Al}_{0.638}\text{As}$ 材料体系的量子级联激光器在48.5 kV/cm的外加电场下的能带图。

实验中采用金属有机物化学气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 技术完成外延生长, 并分别制备了mesa结构的和法布里-珀罗 (Fabry – P é rot, FP) 结构的量子级联激光器器件。其中FP腔器件脊宽为12 mm, 腔长为5 mm。在重复频率100 kHz的和脉冲宽度300 ns的测试条件下, 对mesa结构器件在11 V到16 V的偏压范围内的电致发光 (Electroluminescence, EL) 光谱进行了测试, 其结果如图2所示。在温度为298 K下, 当偏置电压为11 V时, EL光谱的最大半高全宽为75.6 meV, 这一结果代表了目前在长波红外波段中所实现的最宽EL宽度。

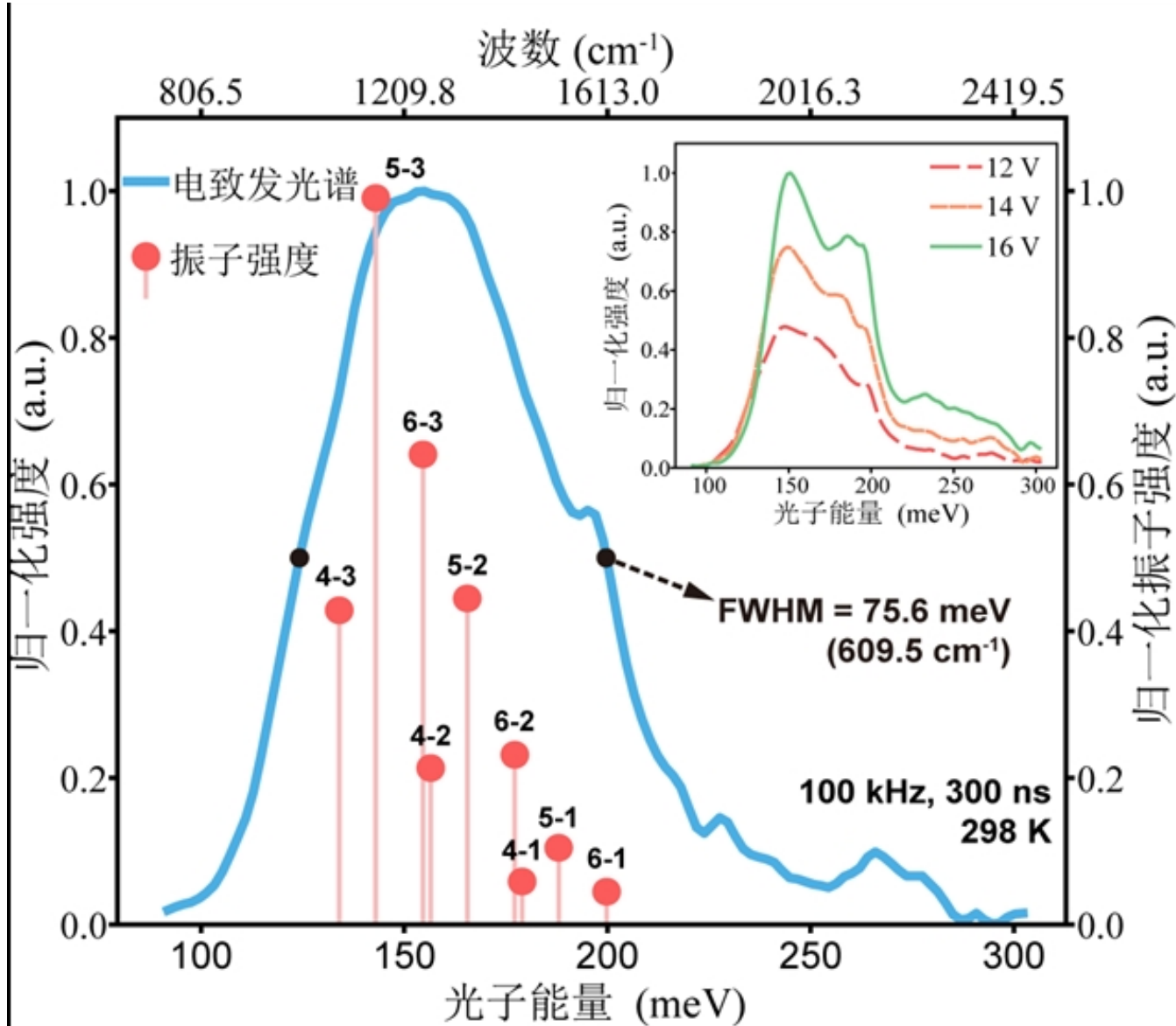


图2. 上激光能级（能级4 - 6）到所有下激光能级（能级1 - 3）的光学跃迁的振子强度与在298 K温度下施加11 V偏压、脉冲宽度为300 ns、重复频率为100 kHz的条件下，具有台面结构的器件实验测量得到的电致发光（EL）光谱的比较。插图展示了在相同温度和脉冲工作条件下，该器件在施加不同偏置电压下的EL光谱的实验结果。

图3显示了FP器件在电流动态范围内不同注入电流下的激光光谱特性。在阈值电流附近，器件呈现出窄带激光光谱特性，其中心波长位于8.8 μm 。在注入电流增至2.5 A的过程中，光谱宽度随电流升高逐渐展宽，同时中心波长会呈现红移趋势，最终移至9.2 μm 。进一步增加电流至反转电流时，激光光谱宽度会持续拓宽到1.2 μm ，中心波长呈现蓝移现象，最终稳定在8.0 μm 。中心波长随偏压的变化而偏移的现象反映了对角跃迁的特性。这种特别的调谐现象是斯塔克效应和多跃迁能级相互作用的结果。1.2 μm 的光谱宽度代表了在室温下单一有源区量子级联激光器在相近波长下所能实现的最宽激光光谱。80 K下同一器件获得1.93 μm 激光谱宽，如图4所示。

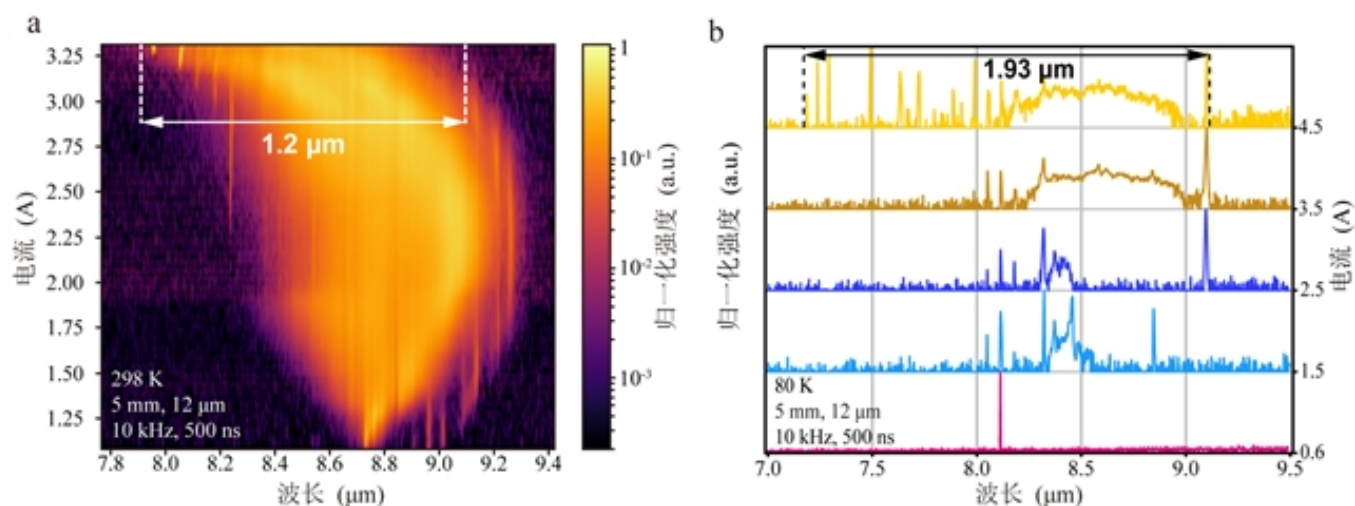


图3. 室温和低温下对角跃迁多态-连续态量子级联激光器的光谱 (a) 298 K下对角跃迁多态-连续态量子级联激光器在脉冲工作模式（重复频率10 kHz，脉冲宽度500 ns）中、阈值电流至翻转电流区间内的激光发射光谱。(b) 80 K下对角跃迁多态-连续态量子级联激光器在脉冲工作模式（重复频率10 kHz，脉冲宽度500 ns）中、阈值电流至翻转电流区间内的激光发射光谱。

总结与展望

该成果成功攻克了单有源区QCL谱宽受限的关键难题，为构建面向中红外频率梳、高精度宽光谱传感、成像及自由空间通信的集成化高效光源开辟了新途径。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02268-8>

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：Bo Meng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