
面发射半导体激光器实现效率突破

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/28358.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！

面发射半导体激光器实现效率突破。四川大学电子信息学院及长光华芯的王俊教授研究团队，通过理论模拟与实验相结合系统研究多结VCSEL在电光转换效率的优势。模拟表明，20结VCSEL在室温下可以实现超过88%的效率。并通过实验实现了15结VCSEL在室温下实现最高74%的效率，相应的微分量子效率超过1100%，是迄今为止报道的VCSEL最大的电光转换效率和微分量子效率。这项研究将为高效率半导体激光器（特别是VCSEL）的进一步开发和应用(激光雷达，高速通信及数据中心算力)提供有价值的参考，并对推动绿色能源光子学产生重大影响。

相关成果以Multi-junction cascaded vertical-cavity surface-emitting laser with a high power conversion efficiency of 74%为题在线发表在Light: Science Applications。四川大学博士研究生肖珪为第一作者，王俊教授为通讯作者。

半导体激光器自问世以来，与其他类型的激光器相比，其中最引人注目之一的优势是能够实现极高的电光转换效率。

追求半导体激光器的超高效率仍然是光子学和激光物理学的一个重要目标。边发射半导体激光器（EEL）自诞生起，其功率转换效率（PCE）的记录不断刷新，2006年在-50℃下达到了85%的历史最高效率记录。紧接着，2007年，EEL在室温条件下也达到了76%的高效率。然而，此后十五年间，再无新的效率记录出现，这些记录一直代表着半导体激光器的最高记录。与EEL不同，垂直腔面发射激光器（VCSEL）的效率提升速度较慢，自2009年报告62%的最高PCE以来，未有显著突破，显示出与EEL明显的性能差异。VCSEL作为微腔激光器，其在光子学领域内实现高效率转换一直是个难题。

因其低的功率和效率，VCSEL的早期应用主要在小型、低功耗消费电子和数据中心的短距离通信上。近年来，随着智能技术进步，低功率的VCSEL已成为智能传感系统的关键核心光源芯片，广泛应用于面部识别和短距离传感，取得显著成功。近期，先进的人工智能技术快速发展，使得VCSEL在传感、通信、原子钟、光学/量子计算、拓扑激光和医学检查等多领域的有着巨大应用潜力。尤其是自动驾驶的长程传感技术、高速数据处理中心的AI计算算力需求，以及VCSEL在智能与量子技术应用中的增长，突显了能源消耗作为一个核心问题。VCSEL的能效对于移动设备和数据中心的能耗有着重要的影响。因此，开发超高效VCSEL对于支持未来智能时代的终端设备发展至关重要。对推动绿色能源光子学的发展也有着重要的影响。

然而，早在1984年，日本东京工业大学的Kenichi Iga教授提出了一种创新的设计方法，如图1所示，通过使用反向隧道结来实现有源区的级联，以增加增益体积。这种设计策略使得载流子能够经历多次受激发射过程，从而不仅提高了器件的微分量子效率，还保持了较低的阈值电流。因此，近年来大量研究人员利于多结VCSEL来实现功率的成倍增长，使得VCSEL已经可用作无人驾驶

汽车的激光雷达光源。然而，多结VCSEL最显著的潜在优势应该是其显著的效率提升。因此，通过理论模拟与实验相结合系统研究多结VCSEL在电光转换效率的优势。

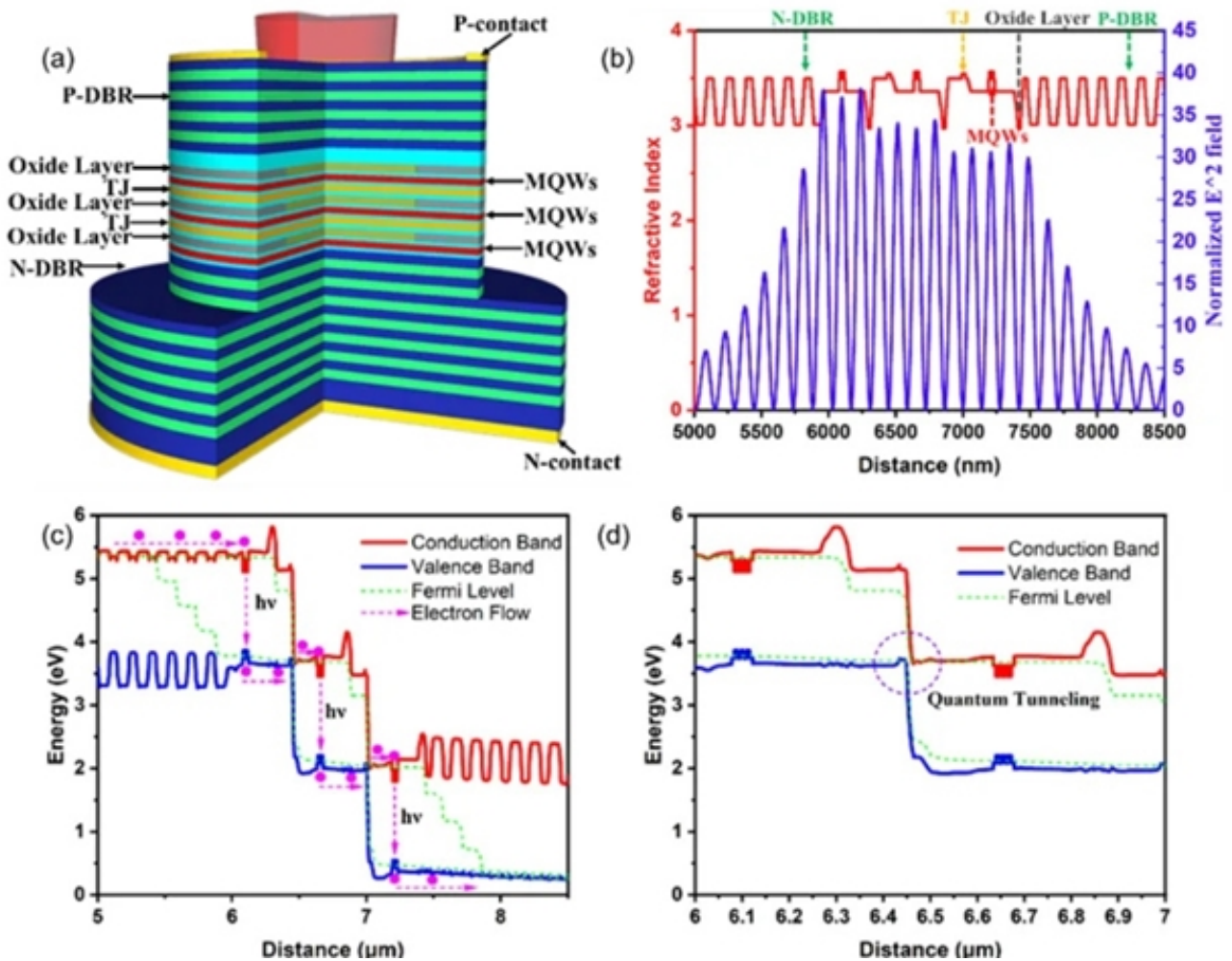


图1 (a) 结构示意图，包括N型分布式布拉格反射器 (N-DBR)、P型分布式布拉格反射器 (P-DBR)、多量子阱 (MQW)、氧化层、隧道结 (TJ) (b) 3结VCSEL的折射率分布、驻波光场分布 (c) 有源区能带结构，通过隧道结级联多个有源区，实现了多次电子跃迁的机制 (d) 偏压下的隧道结能带结构。

仿真结果如图2所示，随着VCSEL中结数量的增加，VCSEL的PCE有显著的提高。20结VCSEL可实现88%的电光转换效率，该电光转换效率已经超过了EEL实验研究中报道的低温工作条件下的最高PCE值。

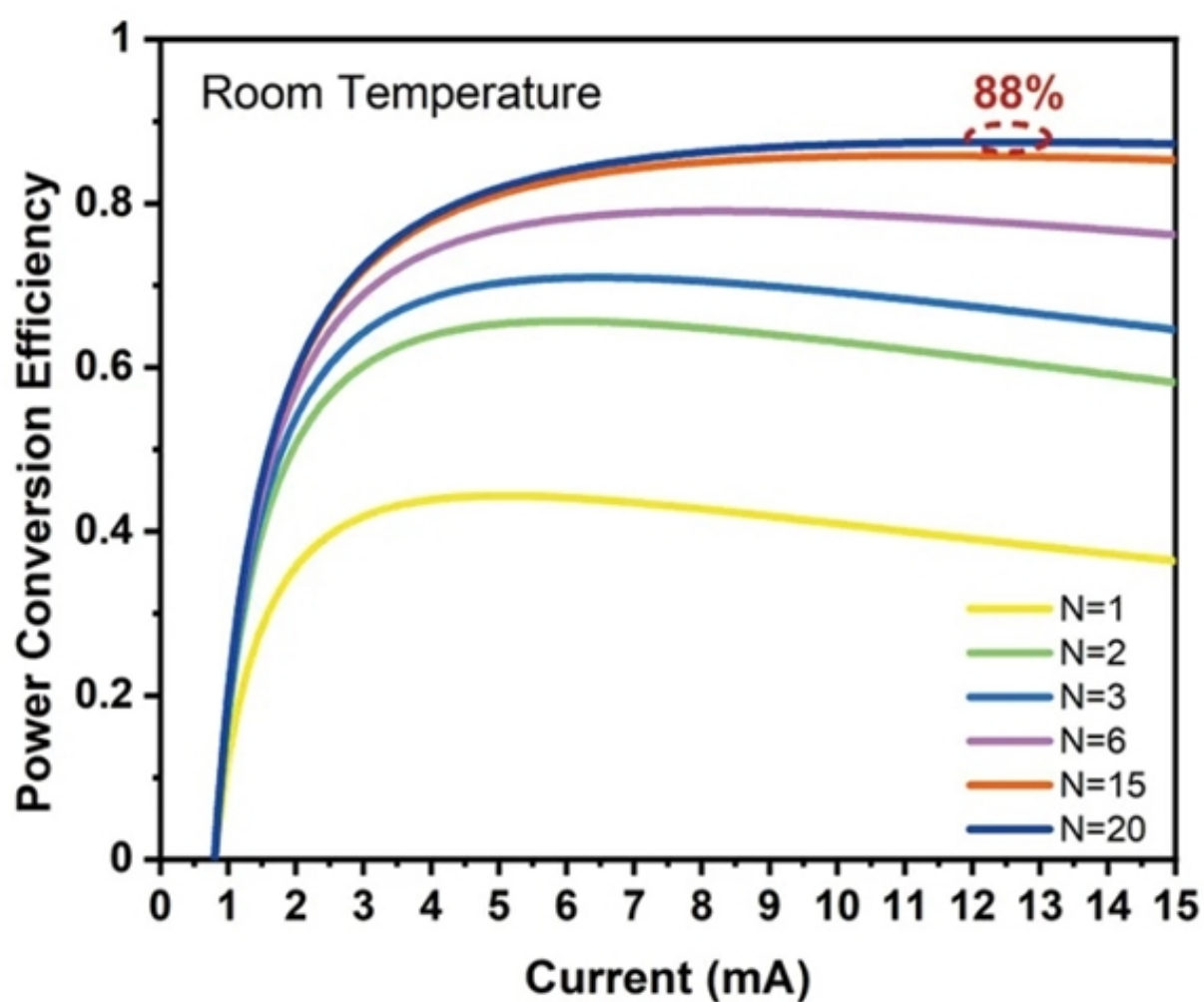


图2 不同结数VCSEL的PCE数值模拟

研究人员制备了不同结数VCSEL器件，并对其进行性能测试，实验结果图3所示，具15结 VCSEL在电流为 7mA 时峰值功率超过了100 mW，最大电光转换效率达到74%，斜率效率为15.6 W/A(其微分量子效率超过1100%)，这是迄今为止报道的VCSEL最大的电光转换效率和微分量子效率。

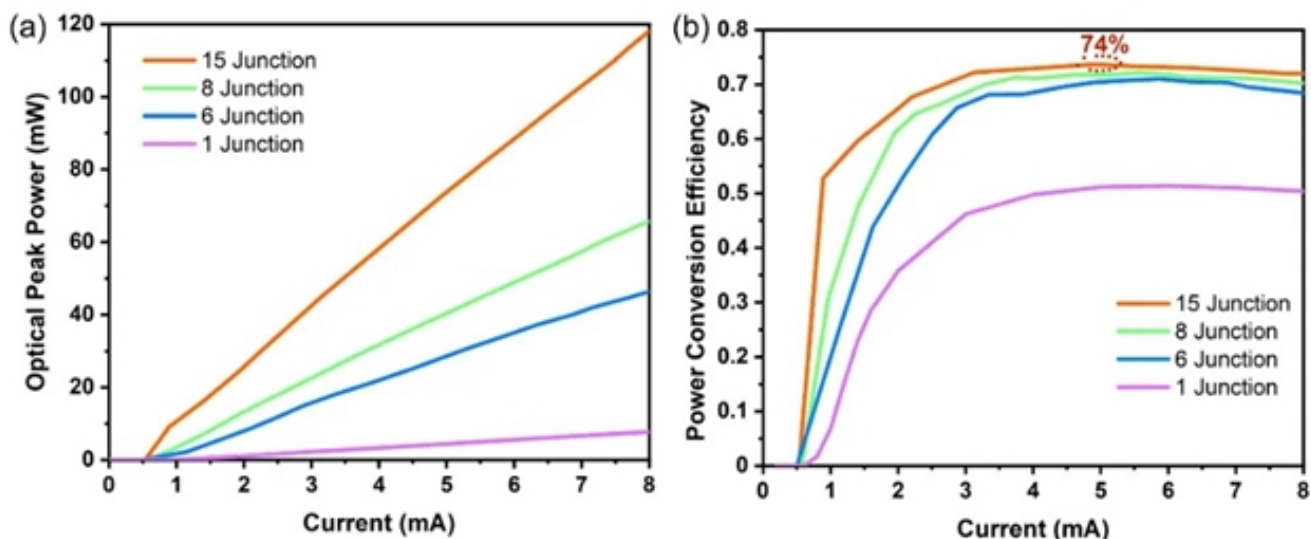


图3 (a) 不同结数的 VCSEL 的L-I-V特性 (b) 不同结数VCSEL的电光转换效率

为了更深入地探究15结VCSEL的电光转换效率增强机制，研究人员基于LIV数据进行了详细的功耗分析。如图4所示，对比了单结和15结的能耗占比。显然，随着结数量的增加，能量消耗的主要减少主要归因于电阻引起的焦耳热比例的下降以及自由载流子吸收导致的内部损耗。这是因为：随着结数增加，多结VCSEL的增益成倍增加，而级联有源层共用一个谐振腔使得电阻和吸收损耗并没有成倍增加，因此，焦耳热和内损耗占比降低，效率提升。然而，对于多结EEL，其结构仅仅为单结EEL的空间堆叠，因此其不能实现效率提升，同时其增加的功率的也为非相关光束的叠加。

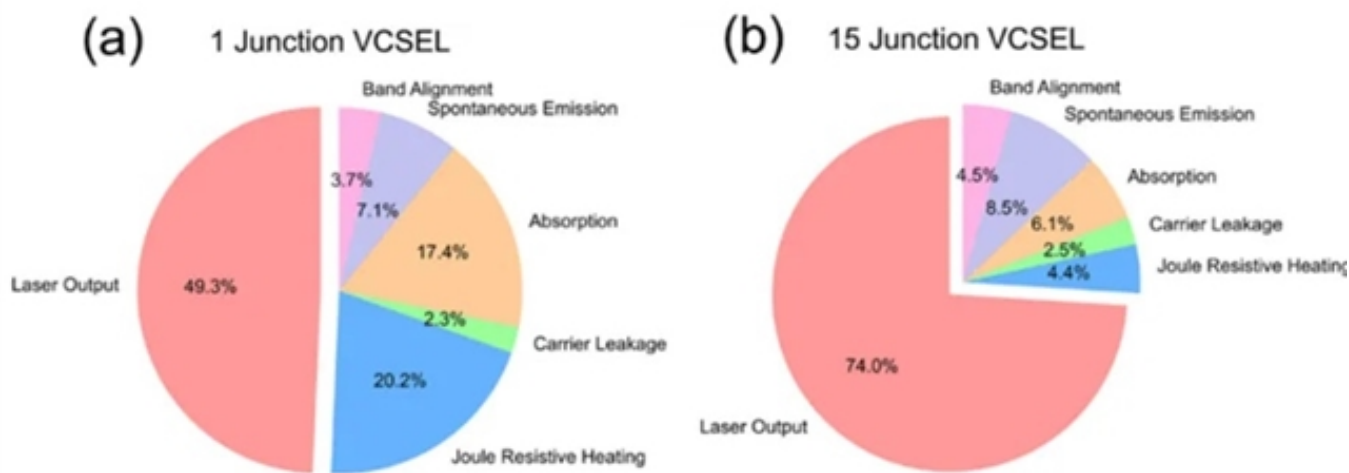


图4 (a)单结VCSEL能耗比 (b)15结VCSEL能耗比。

研究人员统计了历年来半导体激光的效率发展图，如图5所示，正如审稿人所提及：这确实是一个长久停滞领域的一个重要的突破。

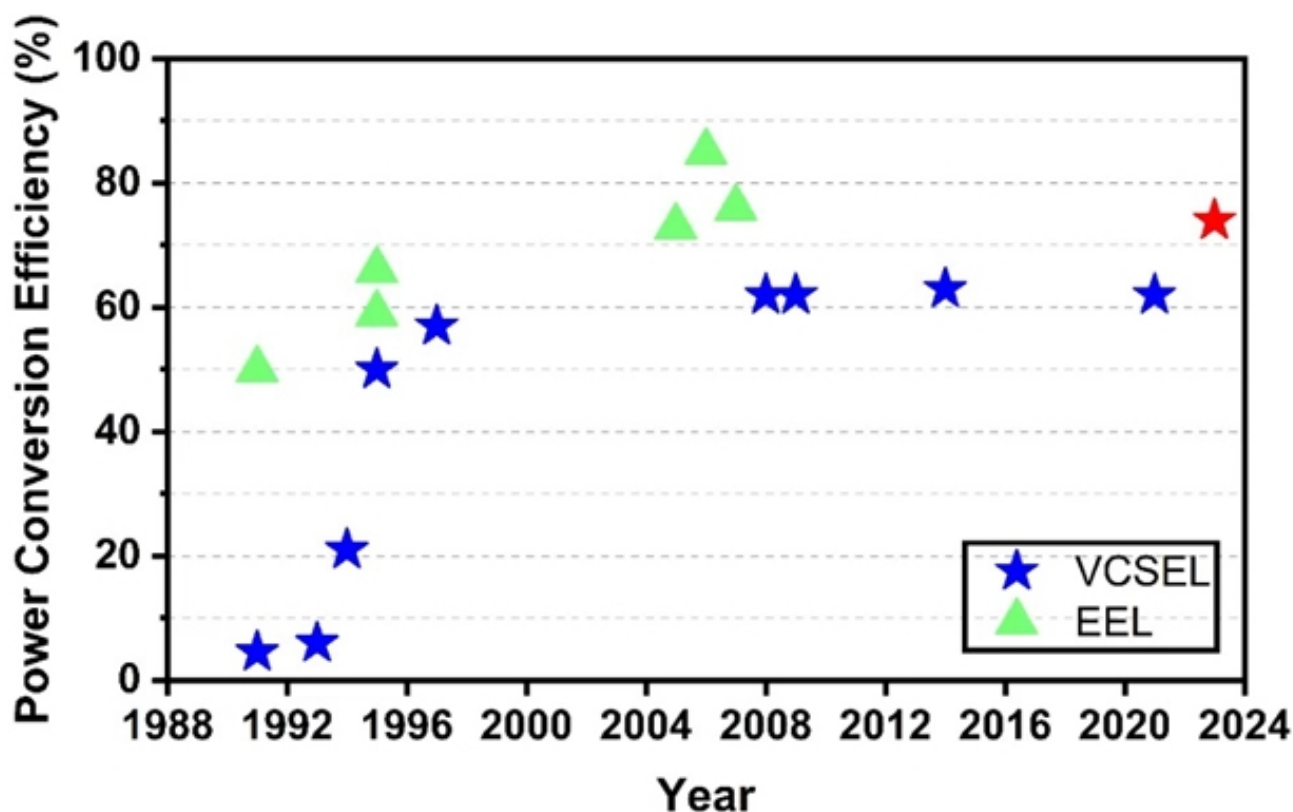


图5 半导体激光器电光转换效率总结

总结与展望

我们模拟了多结 VCSEL 的缩放特性，并与单结 VCSEL 进行了比较。数值模拟表明，20 结 VCSEL 在环境温度条件下的电光转换效率可超过 88%，实验上 15 结 VCSEL 在室温环境下实现了 74% 的电光转换效率，15.6W/A 的斜率效率，其对应的微分量子效率超过 1100%。据我们所知，这一电光转换效率是迄今为止 VCSEL 领域报道的最高效率，该微分量子效率是迄今为止半导体激光器中报道的最高值。未来我们还计划探索拓展高效率、大功率多结 VCSEL 在通信领域的应用。该研究不仅为 VCSEL 的进一步优化和应用提供了有价值的理论和实验证据，也将为高 PCE 半导体激光器的进一步开发和应用提供有价值的参考，对绿色能源光子学和激光物理产生重大影响。（来源：LightScienceApplications 微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01403-7>

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：王俊等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发