



·强激光物理与技术·

## 百瓦级近衍射极限 VCSEL 泵浦激光器\*

李雪鹏<sup>1,2</sup>, 杨 晶<sup>1,3</sup>, 筵兴伟<sup>3</sup>, 陈中正<sup>1,3</sup>, 袁 磊<sup>1,3</sup>,  
杨俊波<sup>4</sup>, 王小军<sup>1,3</sup>, 彭钦军<sup>1,3</sup>, 许祖彦<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所, 中国科学院固体激光重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190;  
3. 齐鲁中科光物理与工程技术研究院, 济南 250000; 4. 国防科技大学 文理学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 报道了高功率、高光束质量的垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 侧泵的 Nd:YAG 激光振荡器。从 VCSEL 泵浦源的主动冷却的热沉结构出发, 设计了 5 个 227 W 的 VCSEL 线阵, 并且通过优化侧面泵浦大口径激光棒的结构, 研制成了具备 480 W 输出能力的棒状激光模块, 相应的光-光效率为 49.7%。在此基础上, 设计了一种高功率、高光束质量的 VCSEL 侧面泵浦棒状 Nd:YAG 激光振荡器。腔内插入望远镜光学元件, 并通过优化各光学元件的参数使其工作在热近非稳区域, 以达到增大基横模体积和抑制高阶横模目的。最终, 获得 114 W 的输出功率, 相应的平均光束质量因子  $M^2$  为 1.42。由于 VCSEL 具备优秀的波长-温度稳定性, 这种高功率、高光束质量的 VCSEL 泵浦的固体激光器在工业、空间等领域, 具有极为广阔的应用前景。

**关键词:** 垂直腔面发射半导体激光器; 激光振荡器; 近衍射极限光束质量; 高功率; 棒状激光器

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220078

## Hundred-watt level VCSEL-pumped laser with near diffraction limit beam quality

Li Xuepeng<sup>1,2</sup>, Yang Jing<sup>1,3</sup>, Yan Xingwei<sup>3</sup>, Chen Zhongzheng<sup>1,3</sup>, Yuan Lei<sup>1,3</sup>,  
Yang Junbo<sup>4</sup>, Wang Xiaojun<sup>1,3</sup>, Peng Qinjun<sup>1,3</sup>, Xu Zuyan<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Solid State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. QiluZhongke Institute of Optical Physics and Engineering Technology, Jinan 250000, China;

4. College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A high power high beam quality vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) side-pumped rod Nd:YAG laser oscillator is demonstrated. Based on the macro-channel optimization of the active heat sink for the VCSEL pump source, five 227 W VCSEL linear arrays are manufactured. By optimizing the structure of the side-pumped diffuse chamber, a rod laser module with an output capacity of 480 W and 49.7% optical-to-optical efficiency is developed. Accordingly, a telescopic module is introduced in the laser oscillator to realize a large fundamental mode volume, and thermal-near-unstable parameters is further optimized to suppress higher transversal modes. Finally, an output power of 114 W is obtained with an average beam quality factor  $M^2$  of 1.42, and the power variations are  $\pm 0.9%$  over 200 s and  $\pm 4.2%$  over the temperature range from 18 °C to 26 °C. To the best of our knowledge, this is the first time that a hundred-watt level and near diffraction limit beam quality laser is generated by VCSEL pumped scheme. Due to the excellent temperature stability of the VCSEL, this high-power and high beam quality solid-state laser has a promising competence in industry, space and other complicated environments.

**Key words:** vertical-cavity surface-emitting laser, laser oscillator, near diffraction limit beam quality, high power, rod laser

\* 收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-05-19  
联系方式: 李雪鹏, lixuepeng16@mails.ucas.ac.cn。  
通信作者: 杨 晶, yangjing@mail.ipc.ac.cn;  
王小军, wangxj@mail.ipc.ac.cn。

相对于传统的边发射半导体激光器 (EEL), 垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 具有发射光束对称性好、输出光谱宽度窄、易于集成和成本低廉等优点<sup>[1-2]</sup>, 已经广泛地应用于消费电子<sup>[3]</sup>、主动照明与自动驾驶<sup>[4]</sup>、医疗美容<sup>[5]</sup>、激光通信<sup>[6]</sup> 等领域。特别在固体激光泵浦源方面, VCSEL 以其极低的温漂系数, 相对窄的输出线宽等优点, 已经成为现有边发射激光器的强有力竞争者。VCSEL 非常适合泵浦固体激光器, 当前 808 nm 单芯片的输出功率已经超过 120 W<sup>[7]</sup>, 电-光转换效率超过 50%<sup>[5]</sup>。因此, VCSEL 已经具备了泵浦高功率固体激光器的能力。长期以来, VCSEL 的应用主要集中在泵浦低重频脉冲振荡器方面<sup>[8-9]</sup>, 并作为理想光源已应用于天基等恶劣环境中<sup>[10]</sup>。由于 VCSEL 芯片电-光转换效率较低、单位发光面上的功率密度低, 使得高功率密度、高效的泵浦耦合存在技术挑战。因此, VCSEL 作为高平均功率泵浦源的应用被大大限制。VCSEL 泵浦的高功率固体激光器可以分为板条激光器和棒状激光器。其中, 高功率板条激光器的可行性已得到验证, 在多模输出的情况下, 最高输出功率超过 400 W<sup>[11-12]</sup>。但是高功率板条激光器的泵浦源面阵冷却结构和泵浦耦合方式不适用于构建结构紧凑的棒状激光器。目前, VCSEL 泵浦的棒状激光振荡器的平均输出功率仅有 W 级<sup>[8-9]</sup>。更高功率是由一个四程放大器产生的, 输出功率达到 95 W<sup>[13]</sup>。但是其结构复杂, 价格昂贵。迄今为止, 尚未发现超过 100 W 的高光束质量的 VCSEL 泵浦棒状激光振荡器的相关报道。

本文从 VCSEL 泵浦源的主动冷却的热沉结构设计出发, 提出了基于血管化的主动热沉结构, 研制出了 VCSEL 线阵侧面泵浦的高功率棒状 Nd:YAG 激光模块, 并获得了 480 W 的多模激光输出。在此基础之上, 采用具有腔内望远镜结构的热近非稳腔设计, 研制成了百瓦级高光束质量的激光振荡器, 测得的平均的光束质量  $M^2$  为 1.42。进一步结合其优秀的波长-温度稳定性, 将在激光加工、空间应用等领域具有广阔的应用前景。

## 1 高功率 VCSEL 泵浦线阵的设计

当前, VCSEL 作为固体激光器的泵浦源主要采用半导体制冷器 (Thermo Electric Cooler, TEC) 冷却或水冷板冷却方式<sup>[10,14]</sup>, 这两种冷却方式可以满足中低功率 VCSEL 阵列的热管理需求, 但是并不能够满足对热管理要求更为严苛的高功率固体激光器的泵浦源。针对高功率半导体激光器具备的产热功率高、热流密度大的特性, 2019 年, 张旭东等人<sup>[15]</sup> 首次将血管化宏通道冷却技术引入到高功率半导体激光器的热管理中, 采用液态金属作为冷却液, 在 2000 W 的热功率下, 产热面的最大温升仅为 24 °C, 为高功率固体激光器泵浦源的热管理问题提供了一个可行且有效的解决方案。

借鉴血管化宏通道冷却技术, 本文设计了一种带有翅片的宏通道热沉冷却 VCSEL 线阵。图 1(a) 为 1×15 VCSEL 线阵的热沉结构示意图。VCSEL 线阵采用 15 个尺寸为 4.7 mm×4.7 mm 芯片组成, 每个芯片的发散角为 14.7°×14.7°(全角), 总的发光面积为 130.7 mm×4.7 mm。为了实现热沉最佳的散热性能, 在铜热沉中插入 15 个翅片组, 每个翅片组包含 5 个翅片, 对应于一个 VCSEL 芯片。为了保证翅片的机械强度, 翅片厚度选为 0.8 mm, 每个翅片的尺寸为 8 mm×4 mm×0.8 mm, 通过仿真优化后确定最近的两个翅片之间的距离为 0.8 mm。VCSEL 芯片与宏通道之间的最短距离为 3 mm。图 1(b) 为在 5 L/min 水流量条件下带翅片宏通道中冷却液的流速分布图。从图中可以看出, 翅片结构中冷却液均匀地流过 VCSEL 所在区域, 为 VCSEL 线阵的均匀散热提供了保障。基于最佳的宏通道散热技术, 该 1×15 VCSEL 线阵的输出功率被实验测试。最终, 获得的最大输出功率为 227 W, 相应的电-光转换效率为 32.3%。仿真和测试结果表明, 带有翅片的宏通道结构的热沉具有良好的散热性能, 并确保泵浦源输出波长的一致性。由于采用宏通道结构, 冷却液不再需要精确的电导率控制和复杂的过滤系统, 这大大降低了固体

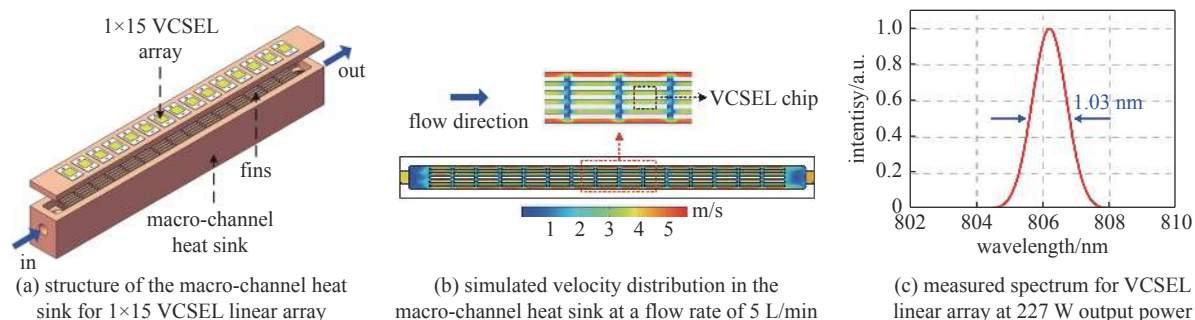


Fig. 1 1×15 VCSEL linear array

图 1 1×15 VCSEL 线阵

激光器泵浦源热管理系统的复杂性和维护成本。

为了更清晰地说明该宏通道结构热沉的热阻分布情况,利用一维(1D)热阻模型对热沉的各组成部分进行了数值计算研究<sup>[11]</sup>。铜热沉的厚度 3 mm,热传导面积 130.7 mm×4.7 mm 时,1×15 VCSEL 线阵的传导热阻  $R_c$  为 0.0122 K/W,总的热阻  $R_{total}$  仅为 0.0203 K/W。

基于优化的宏通道热沉,在水温 20 ℃ 和输出功率 227 W 的条件下,利用光谱仪(HR 4000, Ocean Optics)测试了单个 1×15 VCSEL 线阵的波长特性,典型的结果如图 1(c)所示。从图中可以看出,VCSEL 线阵的中心波长为 806.19 nm,光谱宽度为 1.03 nm。正如我们之前的报道<sup>[16]</sup>,为了更加直观地比较 VCSEL 与 EEL 的激光输出的差异,在输出功率基本一致的情况下测试了两种泵浦源的输出光谱。实验结果表明,VCSEL 和 EEL 的光谱中心波长在 16 ℃ 至 34 ℃ 分别漂移了 1 nm 和 5 nm,相应的光谱半高宽分别为 1.1 nm 和 2.3 nm,计算后温漂系数分别为 0.056 nm/K 和 0.28 nm/K,由此可见,与 EEL 相比,VCSEL 线阵的光谱的温度稳定性更优越。因此,VCSEL 更适合作为固体激光器的温度稳定泵浦源。

## 2 VCSEL 侧面泵浦的 Nd:YAG 激光模块

为了获得高输出功率,本文采用了大口径激光增益介质和大直径反射腔结构<sup>[17-18]</sup>,设计了 5 向 VCSEL 侧面泵浦的激光模块。图 2 为 VCSEL 侧面泵浦 Nd:YAG 棒状激光模块的剖面示意图。为了获得较大的增益体积,降低增益介质中的热流密度,采用了 0.6% 掺杂  $\phi 8$  mm×190 mm 的 Nd:YAG 晶体棒。棒的侧面毛化处理,双端面镀 1064 nm 的高透膜。晶体棒放置在玻璃冷却筒内。冷却液迅速流过晶体和玻璃管之间的间隙。5 个如图 1(a)所示的 VCSEL 线阵以中心对称方式围绕晶体棒放置,晶体棒侧面和泵源 VCSEL 发光面之间的距离为 26 mm。镀金反射腔的直径为 44.4 mm,并且每条边的中间有通光窗口,允许 5 个 VCSEL 线阵的泵浦光直接耦合到激光晶体棒上,该漫反腔的有效反射面积大于 80%。因此,漫反腔将泵浦光均匀地分布在晶体棒上。为了评估该激光模块的增益吸收的均匀性,利用光线追迹方法仿真模拟了棒状增益介质的泵浦吸收情况,如图 2 的插图所示。可以发现,在棒状增益介质的中心的直径为 5 mm 范围内泵浦非常均匀。高增益区增益均匀性可用吸收泵浦功率密度的起伏  $\sigma$ (RMS) 表示,计算结果  $\sigma=0.16$ ,表明增益分布具有径向对称均匀性<sup>[19]</sup>。

为了验证如图 2 所示的 VCSEL 侧面泵浦棒状 Nd:YAG 激光模块的激光性能,进行了多模稳定腔的验证实验。激光谐振腔由一个镀 1064 nm 高反膜的平面反射镜(HR)和一个对 1064 nm 激光透过率为  $T=30\%$  的耦合输出镜(OC)组成,谐振腔的总长度约为 280 mm。图 3 是测量的输出功率和光-光转换效率随总泵浦功率的变化曲线图。如图所示,输出功率和光-光转换效率随着入射泵功率的增加而逐渐增加。当总泵浦功率为 968 W 时,产生了最大激光功率为 480 W 的多模输出,对应的光-光效率为 49.7%,总的电-光效率约为 16%。据我们所知,这是目前 VCSEL 泵浦的高功率固体激光器的所有报道中最高的光-光转换效率。

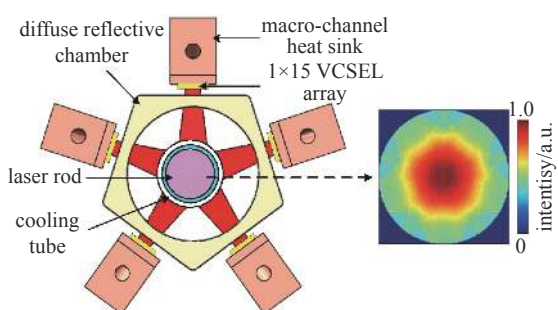


Fig. 2 Pumping configuration of the VCSEL side-pumped rod Nd:YAG laser module. Inset: the simulation of the absorbed pump power distribution in the middle cross section of the  $\phi 8$  mm rod at total pump power of 1135 W

图 2 VCSEL 侧面泵浦 Nd:YAG 棒状激光模块的剖面图。插图:总泵浦功率为 1135 W 时  $\phi 8$  mm 激光棒吸收泵浦功率的分布截面图

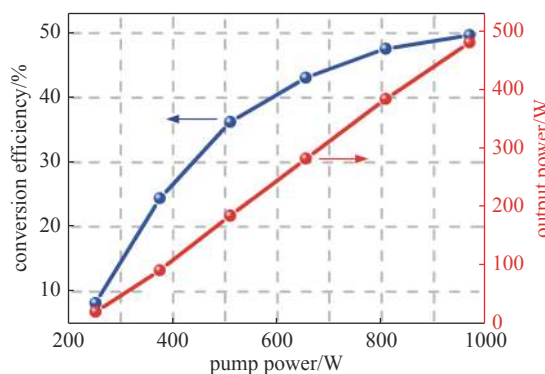


Fig. 3 Output power and optical-to-optical conversion efficiency of the VCSEL-side-pumped rod Nd:YAG laser module versus the pump power under CW operation

图 3 VCSEL 侧面泵浦棒状 Nd:YAG 激光模块的输出功率和光-光转换效率随泵浦功率的变化关系图

## 3 高功率、高光束质量 VCSEL 侧泵 Nd:YAG 激光振荡器

为了进一步获得可实用的具有高功率、高光束质量的 VCSEL 泵浦的固体激光器,本文采用图 2 所示的激光模



块设计了带有望远镜光学元件的热近非稳谐振腔,并通过优化各光学元件的参数以达到增大基横模体积和抑制高阶横模的目的<sup>[20,21]</sup>。图 4 为实验装置图,其中, M1 为镀 1064 nm 高反膜的平凹球面镜 (HR), 曲率半径为  $R$ , M2 是对 1064 nm 激光的透过率为  $T$  的平面耦合输出镜 (OC)。望远镜光学元件由焦距为  $f_1$  的平凹透镜 F1 和焦距为  $f_2$  的平凸透镜 F2 组成。各光学元件的距离分别为  $l_1, l_2, l_3$  和  $l_4$ 。AP 为直径为 5 mm 的圆形光阑, 对激光的高阶横模进行过滤。

为了保持良好光束质量的同时获得高输出功率, 本文首先利用高斯光束的 ABCD 传播矩阵的基横模公式优化了腔体参数。基横模的光斑半径可以表示为

$$\omega = \left( \frac{\lambda B}{\pi} \right)^{1/2} \left[ 1 - \left( \frac{A+D}{2} \right)^2 \right]^{-1/4} \quad (1)$$

其中  $\lambda=1064$  nm,  $A, B$  和  $D$  分别为 ABCD 传播矩阵的矩阵元, 由下式决定

$$M(f) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l+l_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l+l_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l+l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l+l_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中,  $f$  是激光棒的热焦距,  $l$  是 Nd:YAG 棒的长度,  $n$  是 Nd:YAG 的折射率。

通过谐振腔的各光学元件的参数和间距优化, 最终选取  $R=2400$  mm,  $l_1=190$  mm,  $l_2=125$  mm,  $l_3=80$  mm,  $l_4=600$  mm,  $f_1=100$  mm 和  $f_2=300$  mm。图 5 为基横模光斑半径随热焦距的变化曲线。当泵浦功率增加时, 相应的热焦距逐渐减小, 激光器工作状态沿计算曲线向左移动, 然后进入热近非稳区域。热近非稳腔的设计允许激光器在稳定区域的边界运行, 激光棒中的基横模体积大于图中间稳定区域的模体积。这将为高阶横模带来更高的衍射损耗, 但反过来又对基横模光束具有更高的提取效率, 从而确保激光器具有高输出功率和高光束质量。从图 5 中还可以看出, 在激光棒的热焦距为 325 mm 时, 激光棒中的模体积光束半径大约为 1.89 mm。

然后, 我们对输出耦合镜 M2 的透过率与输出功率的关系进行了仔细研究。四能级 Nd:YAG 棒状激光器的输出功率可以表示为<sup>[22]</sup>

$$P_{\text{out}} = A \left( \frac{T}{2-T} \right) I_s \left[ \frac{2g_0L}{\alpha - \ln(1-T)} - 1 \right] \quad (3)$$

其中  $A$  是激光光束的横截面积,  $\alpha$  是腔内损耗,  $I_s = h\nu/\sigma_{21}\tau_f$  是饱和强度, 其中  $h$  是普朗克常数,  $\nu$  是光学频率,  $\sigma_{21}$  是受激发射截面,  $\tau_f$  是上能级荧光寿命,  $g_0$  是稳态条件下的小信号增益系数。采用 Findlay-Clay 方法, 测得的小信号增益系数  $g_0$  和腔内损耗  $\alpha$  分别为  $0.054 \text{ cm}^{-1}$  和 0.24。计算表明, 当最佳输出耦合镜透过率  $T$  约为 30% 时, 可获得最大输出功率。

图 6 为输出镜  $T=30\%$  时激光输出功率随泵浦功率的变化曲线。从图中可以看出, 泵浦阈值功率约为 510 W, 而且从 510 W 到 731 W, 输出功率随泵浦光功率基本呈线性增加。泵浦功率为 731 W 时, 获得了 114 W 最高的连续输出功率, 相应的光-光效率为 15.6%, 总的电光效率约为 5%。该输出功率比先前报道的相关结果<sup>[8,9]</sup> 高出一个量级。然后, 由于激光棒的热透镜效应导致谐振腔的工作状态进入非稳定区域, 输出功率会随着泵浦光功率的进一步增加而减小。

激光的光束质量由光束质量分析仪 (Gentec Electro Optics, BEAMAGE-M2) 测量。图 7 为在最大输出功率时的光束质量测量值。如图所示, 测得的  $x$  方向光束质量因子  $M_x^2=1.52$ ,  $y$  方向  $M_y^2=1.31$ , 相应的平均光束质量因子  $M^2=1.42$ 。图 7 中的插图为光束的二维空间强度分布图, 表明该激光器在良好的高斯模式下工作。据我们所知, 这是首次实现接近衍射极限光束并且输出功率超过 100 W 的 VCSEL 泵浦固体激光器。

实验进一步研究了该激光器的稳定性。图 8 为水温为 20 °C 时的最大输出功率的稳定性测试曲线和输出功率

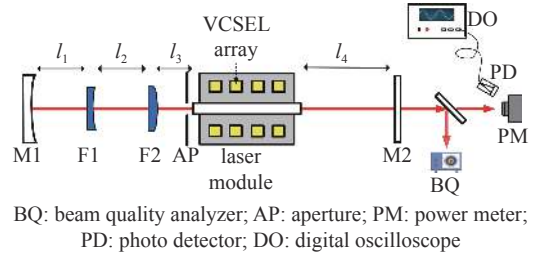


Fig. 4 Schematic diagram of the VCSEL side-pumped rod Nd:YAG laser oscillator with telescopic resonator

图 4 带有望远镜光学元件的 VCSEL 侧面泵浦棒状 Nd:YAG 激光振荡器的实验装置图

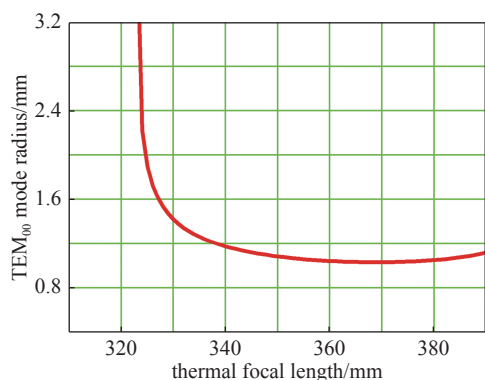


Fig. 5 Fundamental laser mode radius versus the thermal focal length

图 5 计算的基横模光斑半径随热焦距的变化曲线

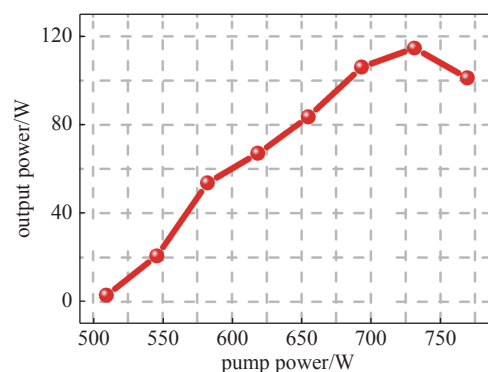


Fig. 6 Output power as a function of the pump power

图 6 输出功率随泵浦功率的变化曲线

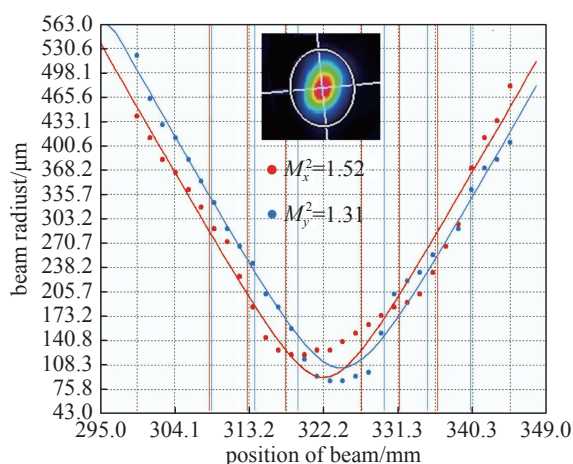


Fig. 7 Measured beam quality factors at the maximum output power.

Inset: beam two-dimensional spatial profile

图 7 最大输出功率下的 VCSEL 侧面泵浦棒状激光器的光束质量测量值。插图: 光束的二维空间强度分布图

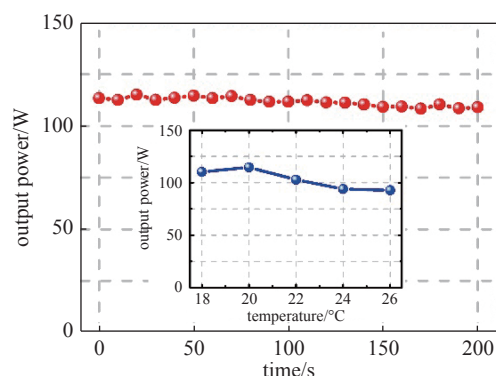


Fig. 8 Power-stability test at the highest output over 200 s. Inset: output power versus the coolant temperature

图 8 200 s 内的最大的输出功率稳定性的测试曲线。插图: 最大的输出功率随冷却液温度的变化曲线

随冷却液温度的变化曲线。从图中可以看出,在 200 s 内,最大输出功率的波动不超过 $\pm 0.9\%$ (标准方差);当温度从 18 °C 变化到 26 °C 时,输出功率的波动小于 $\pm 4.2\%$ 。由于 VCSEL 的波长随温度的变化较小,在宽温度范围内,VCSEL 泵浦的 Nd:YAG 激光器的输出功率具备优异稳定性<sup>[12]</sup>。因此,再进一步采用低热膨胀的光机材料和底板的温度控制后,这种温度稳定性高的高功率、高光束质量的固体激光器非常适合环境恶劣的外场应用。

## 4 结论

本文研制了一种高功率 VCSEL 侧面泵浦棒状 Nd:YAG 激光器。多模输出时,获得的最高输出功率为 480 W,对应的光-光效率为 49.7%。据我们所知,这是目前 VCSEL 泵浦固体激光器的所有报道中的最高输出功率和最高光-光转换效率;基模输出时,获得了 114 W 的输出功率,相应的光-光转换效率为 15.6%,平均光束质量因子  $M^2$  为 1.42。这是首次报道的近衍射极限光束的百瓦级 VCSEL 泵浦的固体激光振荡器。并且,该基模激光器的最大输出功率的波动在 200 s 内不超过 $\pm 0.9\%$ ,在 18 °C 到 26 °C 温度范围内小于 $\pm 4.2\%$ 。这种高功率、高光束质量、高稳定性的固体激光器在工业加工、野外、空间等复杂环境中具有广阔使用前景。

**致谢** 感谢崔大复研究员在文章撰写过程中给予的指导和帮助。

## 参考文献:

- [1] 马骁宇,张娜玲,仲莉,等.高功率半导体激光泵浦源研究进展[J].强激光与粒子束,2020,32:121013.(Ma Xiaoyu, Zhang Naling, Zhong Li, et al. Research progress of high power semiconductor laser pump source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 121013)
- [2] 刘芳华,龚鑫,张雅楠,等.808 nm垂直腔面发射激光器阵列抽运的全固态激光器研究进展[J].激光与光电子学进展,2019,56:120001.(Liu Fanghua, Gong Xin, Zhang Yanan, et al. Research progress on 808 nm VCSEL-array-pumped solid-state lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56: 120001)

- [3] Seurin J F, Zhou Delai, Xu Guoyang, et al. High-efficiency VCSEL arrays for illumination and sensing in consumer applications[C]//Proceedings of SPIE 9766, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XX. 2016: 97660D.
- [4] Seurin J, Xu Guoyang, Guo Baiming, et al. Efficient vertical-cavity surface-emitting lasers for infrared illumination applications[C]//Proceedings of SPIE 7952, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XV. 2011: 79520G.
- [5] Zhou Delai, Seurin J F, Xu Guoyang, et al. Progress on high-power 808nm VCSELs and applications[C]//Proceedings of SPIE 10122, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXI. 2017: 1012206.
- [6] Moser P, Hofmann W, Wolf P, et al. 81 fJ/bit energy-to-data ratio of 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers for optical interconnects[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98: 231106.
- [7] Seurin J F, Xu Guoyang, Khalfin V, et al. Progress in high-power high-efficiency VCSEL arrays[C]//Proceedings of SPIE 7229, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XIII. 2009: 722903.
- [8] Goldberg L, McIntosh C, Cole B. VCSEL end-pumped passively Q-switched Nd: YAG laser with adjustable pulse energy[J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4261-4267.
- [9] Van Leeuwen R, Xu Bing, Wang Qing, et al. Passively Q-switched VCSEL-pumped Nd: YAG laser with 47 mJ pulse energy[C]//Proceedings of SPIE 10082, Solid State Lasers XXVI: Technology and Devices. 2017: 100820L.
- [10] 陈思露, 张鑫, 蒋静, 等. VCSEL侧面抽运的全固态激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45: 1001001. (Chen Silu, Zhang Xin, Jiang Jing, et al. VCSEL side-pumped all solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45: 1001001)
- [11] Li Xuepeng, Zhang Xudong, Yang Jing, et al. Wavelength-stable 1.1-kW diode laser array cooled by liquid metal[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(7): 434-437.
- [12] Di Pengcheng, Li Xuepeng, Yang Jing, et al. High-power VCSEL-pumped slab laser with temperature fluctuation adaptability[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(8): 395-398.
- [13] Wang Chao, Wei Hui, Jiang Youen, et al. VCSEL-pumped Nd: YAG laser with 95 W average power and user-selectable nanosecond pulses[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14: 121402.
- [14] Van Leeuwen R, Xiong Yihan, Seurin J F, et al. High-power vertical-cavity surface-emitting lasers for diode pumped solid-state lasers[C]//Proceedings of SPIE 8381, Laser Technology for Defense and Security VIII. 2012: 83810I.
- [15] Zhang Xudong, Li Xuepeng, Zhou Yixin, et al. Vascularized liquid metal cooling for thermal management of kW high power laser diode array[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114212.
- [16] 邸鹏程. 新型波前探测及VCSEL泵浦板条激光技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021: 86-90. (Di Pengcheng. Researches on novel wavefront detection and VCSEL-pumped slab laser technology[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021: 86-90)
- [17] Furuta K, Kojima T, Fujikawa S, et al. Diode-pumped 1 kW Q-switched Nd: YAG rod laser with high peak power and high beam quality[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(19): 4119-4122.
- [18] Kozeki T, Sakashita M, Miura T, et al. Development of cw-diode pumped amplifier for over 1-kW-average-power solid-state laser system[C]//Proceedings of the Conference Lasers and Electro-Optics. 2005: 162-164.
- [19] 肖红, 赵天卓, 樊仲维, 等. 大口径轴向非均匀Nd: YAG晶体抽运设计[J]. *中国激光*, 2015, 42: 0602002. (Xiao Hong, Zhao Tianzhuo, Fan Zhongwei, et al. Pump design of large-diameter axial non-uniform Nd: YAG crystal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42: 0602002)
- [20] Hanna D C, Sawyers C G, Yuratich M A. Telescopic resonators for large-volume TEM<sub>00</sub>-mode operation[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1981, 13(6): 493-507.
- [21] Feng Yan, Bi Yong, Xu Zuyan, et al. Thermally near-unstable cavity design for solid state lasers[C]//Proceedings of SPIE 4969, Laser Resonators and Beam Control VI. 2003: 227-232.
- [22] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. 6th ed. New York: Springer, 2006: 102-127.