

非制冷型多波长 VCSEL 泵浦固体激光器的研究

苟栋良^{1,2}, 李 阳^{2,3}, 邱小浪^{2,3}, 袁崇献^{2,3}, 范鑫烨¹, 李川川², 韦 欣^{2,3}

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室, 北京 100083;
3. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 固体激光器的应用需求持续增长, 传统 Nd:YAG 激光器因依赖复杂的温控系统面临高成本、高功耗和较差的机械性能等问题, 为拓展应用场合亟待解决。本文提出一种非制冷型多波长 VCSEL 泵浦固体激光器设计方案, 旨在通过优化多波长 VCSEL 组合实现宽温区内的高功率稳定输出。研究采用三波长 VCSEL 阵列作为泵浦源, 对尺寸为 $\Phi 6\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 、掺杂浓度为 1.0 at. % 的 Nd:YAG 晶体进行侧面泵浦。多波长 VCSEL 阵列波长互补, 有效降低了温度漂移对晶体吸收效率的影响。同时, 四面泵浦设计提高了泵浦光程利用率和粒子数反转的均匀性。实验结果表明, 在 5~45 °C 内, 该激光器可高性能工作, 45 °C 时, 输出功率仍可超过 100 W。在泵浦电流 80 A、重复频率 20 Hz 下, 3:2:1 模块的最大峰值功率达 302.8 W, 整体波动性为 17.83 %, 均优于单波长模块。多波长模块通过多波段补偿机制, 在极端温度下仍保持较高稳定性。

关键词: 多波长 VCSEL 阵列; 宽温区; 固体激光器; 非制冷

中图分类号: TN248.1; O437 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.004

Research on uncooled multi-wavelength VCSEL pumped solid-state laser

GOU Dong-liang^{1,2}, LI Yang^{2,3}, QIU Xiao-lang^{2,3}, YUAN Chong-xian^{2,3},
FAN Xin-ye¹, LI Chuan-chuan², WEI Xin^{2,3}

(1. School of Physical Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;
2. Nano Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083;
3. College of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The application demand of solid-state lasers continues to grow, and traditional Nd:YAG lasers are faced with high cost, high power consumption and poor mechanical properties due to the dependence on complex temperature control systems, which need to be solved urgently in order to expand applications. In this paper, an uncooled multi-wavelength VCSEL pumped solid-state laser design scheme is proposed, aiming to achieve high power stable output over a wide temperature region by optimizing multi-wavelength VCSEL combination. A three-wavelength VCSEL array was used as a pump source to side-pump Nd:YAG crystals with a size of $\Phi 6\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ and a doping concentration of 1.0 at. %. Wavelength complementation of multi-wavelength VCSEL arrays effectively reduces the influence of temperature drift on crystal absorption efficiency. At the same time, the four-sided pump design improves the utilization rate of pump light range and the uniformity of particle number inversion. The experimental results show that the laser can work with high performance at 5~45 °C, and the output power can still exceed 100 W at 45 °C. Under the pump current of 80 A and repetition frequency of 20 Hz, the maximum peak power of 3:2:1 module reaches 302.8 W,

作者简介: 苟栋良 (1999 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光器。E-mail: goudl@semi.ac.cn

通讯作者: 韦 欣 (1974 -), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为红外波段探测器和激光器、垂直腔面发射激光器的研制和开发, 以及表面等离激元在半导体光电子器件中的应用。E-mail: weix@semi.ac.cn

收稿日期: 2025-03-19

and the overall fluctuation is 17.83 %, which is better than that of single-wavelength module. Multi-wavelength modules maintain high stability at extreme temperatures through multi-band compensation mechanism.

Keywords: multi wavelength VCSEL array; wide temperature range; solid-state laser; uncooled

1 引言

固体激光器领域,掺钕的钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器因其卓越的物理特性和广泛的应用前景而持续受到关注。半导体激光器阵列泵浦技术的发展,特别是与Nd:YAG的强吸收峰相匹配的特性,推动了固体激光器的快速进步。然而,传统边发射半导体激光器的波长对温度变化非常敏感,波长漂移系数约为 $0.3\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,即无制冷下,边发射半导体激光器波长会偏离Nd:YAG晶体的吸收峰,降低激光器的效率,甚至导致整机无法正常工作^[1-3]。有制冷可有效控制波长漂移,但不仅增加了系统的复杂性、成本和体积,还限制了激光器在某些特殊环境下的应用灵活性^[4-5]。因此,探索一种能够在较宽温度范围内保持高光谱重叠率的泵浦技术,对于提升激光器的环境适应性、降低体积、重量和功耗具有重要意义。

1999年,808nm VCSEL 被用于泵浦 Nd:YVO₄^[6]。之后,大多数研究集中在无温控泵浦固体激光器。2016年,武汉军械士官学校的刘旭等人提出了一种免温控泵浦源的多波长选择理论^[7],这一理论能够在较宽的温度范围内实现激光器的免温控运行。2017年,Robert Van Leeuwen 团队报道了一种被动调Q的VCSEL泵浦Nd:YAG激光器^[8]。实验使用了水冷808 nm VCSEL 模块,包含四个高功率芯片,总峰值功率2.3 kW,实现了15 Hz 重复频率下47 mJ 的脉冲能量和16%的光光转换效率。此外,使用1.6 kW 风冷VCSEL 模块的激光器输出37 mJ 脉冲能量,而单个5 mm×5 mm 的VCSEL 芯片的紧凑激光器则能输出超过13 mJ 的脉冲能量。2020年,王智勇提出了一种多波长二极管阵列端泵浦Nd:YAG脉冲激光器设计^[9]。该激光器所采用的多波长比例为1:1:1:1并在室温下实现了72 mJ 的脉冲能量和11.25 %的光-光转换效率,并且在-40~60℃的温度范围内展现出了优异的输出能量和脉冲宽度稳定性。可见,多波长VCSEL 阵列技术可实现非制冷系统的侧泵浦Nd:YAG激光器。多波长VCSEL 阵列技术通过中心波长分散设计,确保了在宽温度范围内,实现Nd:YAG晶体高稳定性吸收。这不仅提升了激光器对环境变化的适应性,大幅度的降低功耗,还有助于减小激光器的体积和重量,优化了整体设计。

鉴于上述情况,本文提出了一种创新性的解决方案,即采用多波长VCSEL 阵列作为泵浦源。这种方法非制冷下就能确保半导体激光器阵列的输出光谱与Nd:YAG晶体的吸收光谱高度重叠,从而提高了激光器在不同环境中的稳定性和适应性,简化了系统设计,减小了设备的体积和整体重量。本文使用了一个三波长VCSEL 阵列为泵浦源,对尺寸规格为 $\Phi 6\text{ mm} \times 40\text{ mm}$,掺杂浓度为1.0 at.% 的Nd:YAG晶体进行侧面泵浦。在5~45℃的环境温度范围内,实现了高输出功率且功率稳定。

2 理论分析

2.1 增益介质的泵浦源特性

Nd:YAG晶体因其优异的综合性能被广泛用作激光器的增益介质^[10]。对于Nd³⁺掺杂浓度为1.0 at.% 的Nd:YAG晶体,其在790 nm~820 nm 光谱范围内的吸收特性具有显著波长依赖性:吸收系数越大,对应波长的泵浦光吸收能力越强,反之则需通过增加晶体有效吸收长度来补偿较弱的吸收能力^[11]。基于此原理,本研究设计了四面泵浦Nd:YAG晶体棒结构,如图1所示。

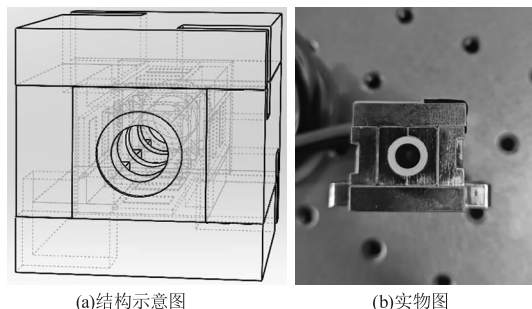


图1 四面泵浦Nd:YAG晶体结构示意图和实物图

Fig. 1 Schematic diagram and physical diagram of the crystal structure of four-sided pumped Nd:YAG

通过多波长手段提升泵浦效率。首先在晶体侧面进行打毛处理以降低表面反射损耗,同时在两端镀制1064 nm 增透膜以优化透射特性。四面入射的泵浦光可在晶体内部形成多向照射,通过延长泵浦光传播路径显著增加有效吸收长度;同时多向均匀照射促使激活离子对泵浦能量的均衡吸收,既提升了能量利用率,又实现了更均匀的粒子数反转分布。这种优化的能量吸收模式有效抑制了激光输出功率波动,尤其在连续工作和高重复频率脉冲模式下,可

显著增强激光输出的功率稳定性。

VCSEL 的高表面发射率对于对向入射光不敏感,可以实现对称排列。将 VCSEL 阵列在不借助额外光束整形的情况下,均匀排布于晶体的四个侧面,具体布局如图 1 所示。通过对称分布光源,泵浦光能够同时从四个方向注入 Nd:YAG 晶体棒,显著提升了光路的利用率,进而优化了泵浦过程。

2.2 单个 VCSEL 阵列温度特性

实验测试 808 nm 的 VCSEL 阵列,每个芯片的尺寸为 5 mm × 5 mm,发光区域为 4.8 mm × 4.8 mm。芯片以六方密排方式排列。使用重复频率为 20 Hz、脉冲宽度为 200 μs 的脉冲信号驱动 808 nm 的 VCSEL 阵列,如图 2(a)所示,非制冷下单片 VCSEL 阵列不同温度下的输出功率和光谱,在环境温度从 0 °C 变化至 50 °C 的过程中,VCSEL 阵列的输出功率从 67.125 W 下降到 51 W,下降了 24 %。同时,还测量了 VCSEL 阵列的光谱特性,结果如图 2(b)所示,0 °C 的中心波长 804.7 nm,红移至 50 °C 的 808.4 nm,温漂 0.074 nm/°C。

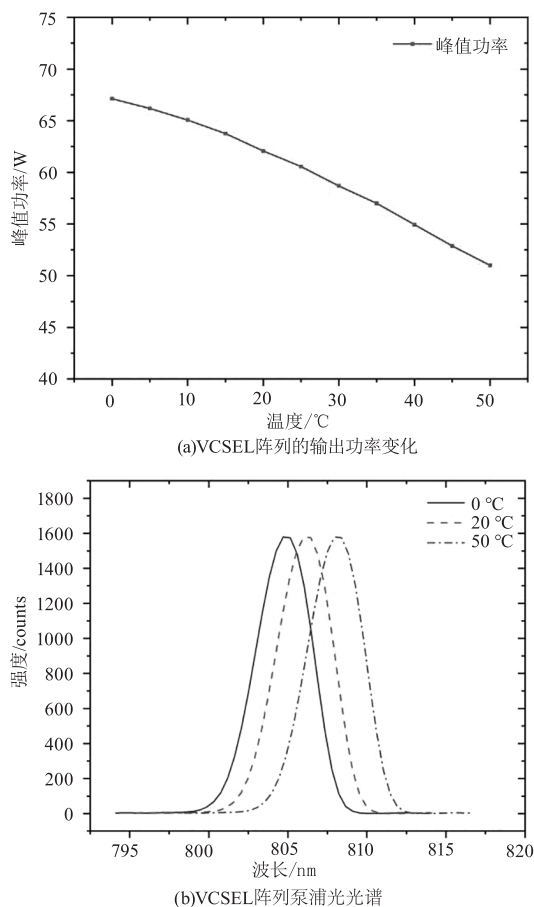


图2 在 0 ~ 50 °C 范围内,VCSEL 阵列的输出功率及光谱
Fig. 2 The output power and spectrum of VCSEL array
in the range of 0 ~ 50 °C

2.3 泵浦模块的选择

在 Nd:YAG 晶体的四能级系统中,808 ± 2 nm 波长区间存在特征吸收峰,其吸收系数呈现非均匀分布特性。基于此,建立了光谱匹配度遴选准则,优先选择满足中心波长在特征吸收峰附近且半峰全宽较小的 VCSEL 阵列,使泵浦光与 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 跃迁通道的量子效率最大化^[12]。根据光谱匹配度遴选准则,本文设计了基于三波长的泵浦源。该泵浦源由 12 组 VCSEL 阵列构成,每个泵浦面配置三个 VCSEL 芯片,其结构示意图如图 3 所示。

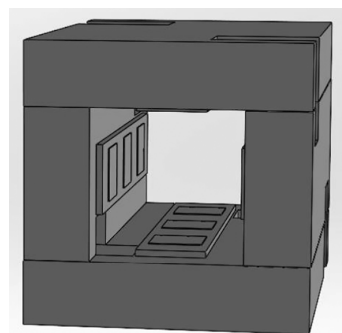


图3 12 个 VCSEL 阵列四面分布示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the four-sided distribution
of the 12 VCSEL arrays

利用多波长互补的特性对泵浦源的波长组合进行设计,考虑到 VCSEL 在宽温区的温度漂移行为,通过波长组合的配比,维持不同温度下激光波长与吸收峰的重叠,从而有效缓解对模块输出功率的影响。在实验设计中,分析了多种不同配比的波长组合所产生的影响,借助 MATLAB 模拟了不同波长比例组合下晶体的吸收功率,发现 3 : 2 : 1 模块在宽温区内能够更好地维持稳定的吸收效率。所以,选取 1 : 1 : 1、3 : 2 : 1 和单波长作为泵浦模块的比例设计方案。在 25 °C 下,比例为 1 : 1 : 1 模块选取的中心波长分别为 804.5 nm、806.1 nm 和 806.4 nm;比例为 3 : 2 : 1 模块选取的中心波长分别为 806.7 nm、807 nm 和 808.5 nm;单波长模块的中心波长为 805.5 nm。泵浦模块的结构及实物图详见图 4。

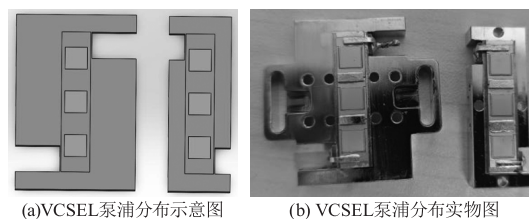


图4 三波长泵浦模块
Fig. 4 Three-wavelength pumping module

在多波长 VCSEL 阵列泵浦过程中,谱线宽对晶体的吸收效率有显著影响。因此,有必要对泵浦模块的谱线宽进行筛选。VCSEL 阵列的发射光谱可近似为高斯函数,如图 4 所示,其强度分布可用以下公式表示:

$$I_{\lambda} = I_0 \cdot e^{-\frac{\lambda - \lambda_0}{\delta^2}} \quad (1)$$

其中, I_0 是频域中谱线中心光强; λ_0 是 VCSEL 阵列的中心波长; δ 是发射谱线的半高全宽。

为了计算增益介质在多波长泵浦过程中吸收的总能量 E , 需要对构成泵浦源的不同比例和中心波长的 VCSEL 阵列, 所对应的增益介质吸收的能量进行加权求和。公式表示如下^[13]:

$$E = \sum_{i=1}^n N_i \int I_0 \cdot e^{-\frac{\lambda - \lambda_0}{\delta^2}} - \alpha L d\lambda \quad (2)$$

其中, N_i 表示在相同泵浦条件下, 具有不同中心波长的单个 VCSEL 阵列的输出能量占总能量的比例; α 表示增益介质的吸收系数; L 表示有效吸收长度。

在特定波长范围内, Nd : YAG 晶体对泵浦光的吸收特性存在显著差异, 不同波长对应着各异的吸收效率。本研究采用直径为 6 mm 的晶体, 并运用侧面四向泵浦方式, 以实现泵浦光的充分吸收。

3 实验装置

实验装置示意图, 如图 5 所示。

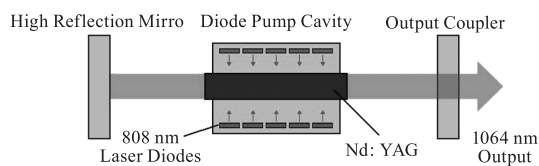


图 5 装置示意图

Fig. 5 Installation diagram

四能级 Nd : YAG 棒状激光器的输出功率可以用以下形式^[14]:

$$P_{out} = A \left(\frac{T}{2 - T} \right) I_s \left[\frac{2g_0 L}{\alpha - \ln(1 - T)} - 1 \right] \quad (3)$$

其中, A 是激光束的横截面积; α 是谐振腔的往返损耗; L 是谐振腔中晶体的长度; I_s 为饱和强度; g_0 为稳态条件下的小信号增益系数, 如公式 (5) 所示:

$$g_0 = \sigma_{21} n W_p \tau_f / (W_p \tau_f + 1) \quad (4)$$

其中, σ_{21} 为受激发射截面; τ_f 为上能级荧光寿命; n 为 Nd : YAG 晶体中掺杂粒子数浓度; W_p 为泵浦光功率。根据计算, 当输出耦合镜透过率 T 约为 20 % 时,

可实现最大输出功率。因此, 实验中使用 $T = 20 \%$ 的输出耦合镜。

多波长 VCSEL 阵列侧面泵浦 Nd : YAG 激光器的实验装置如图 6 所示。该装置中使用的全反镜 (M1) 和输出耦合镜 (M2) 均为平面镜, 其中 M1 是镀有 1064 nm 高反膜的全反镜 (HR), M2 是对 1064 nm 激光具有一定透过率的输出耦合镜 (OC), 平平腔腔长 160 mm。工作物质为掺杂浓度为 1.0 at. % 的 Nd : YAG 晶体, 尺寸为 6 mm × 40 mm。晶体的两侧表面经过打毛处理, 两端面镀有 1064 nm 增透膜。

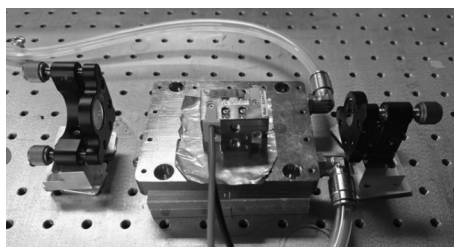


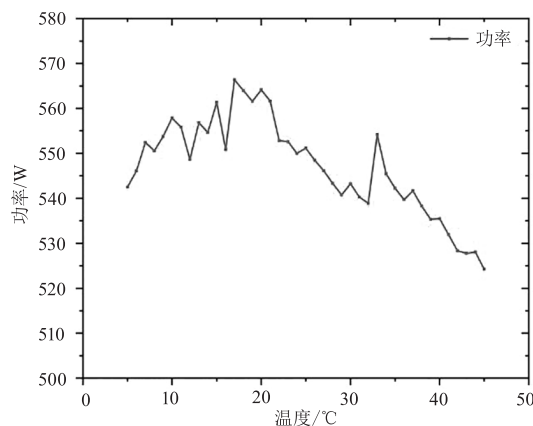
图 6 多波长 VCSEL 阵列侧面泵浦 Nd : YAG 激光器实验装置实物图

Fig. 6 Experimental device of multi-wavelength VCSEL array side-pumped Nd : YAG laser

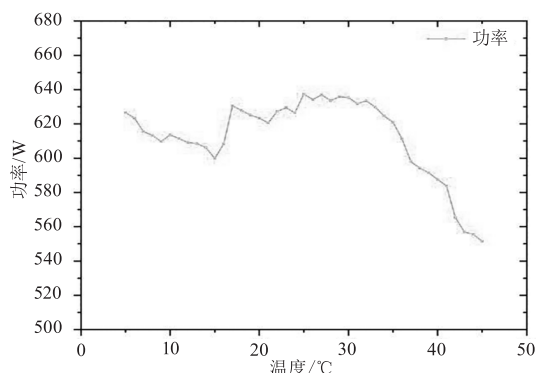
4 实验结果

4.1 理论模拟分析

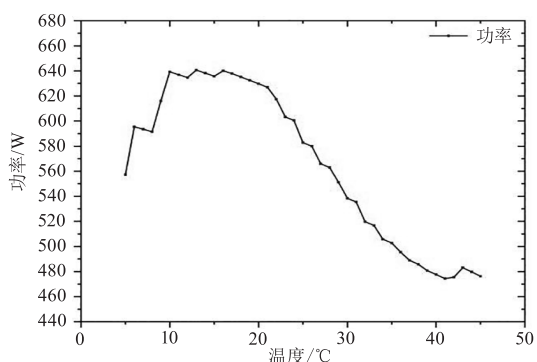
选择泵浦源的关键在于 VCSEL 阵列的发射光谱与 Nd : YAG 晶体的吸收光谱的匹配度。本文采用不同配置模块的波长组合, 中心波长分别为 804.5 nm@25 °C、806.1 nm@25 °C、806.4 nm@25 °C (比例 1 : 1 : 1 组)、806.7 nm@25 °C、807 nm@25 °C、808.5 nm@25 °C (比例 3 : 2 : 1 组) 以及 805.5 nm@25 °C (单波长组) 的 VCSEL 阵列。三个模块的模拟结果如图 7 所示。



(a) 比例 1:1:1 组模拟图



(b) 比例3:2:1组模拟图



(c) 单波长组模拟图

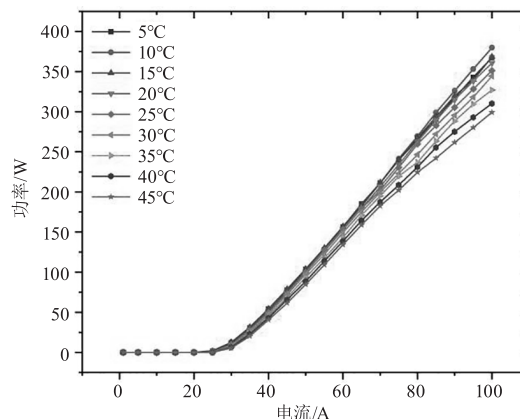
图7 理论模拟图

Fig.7 Theoretical simulation diagram

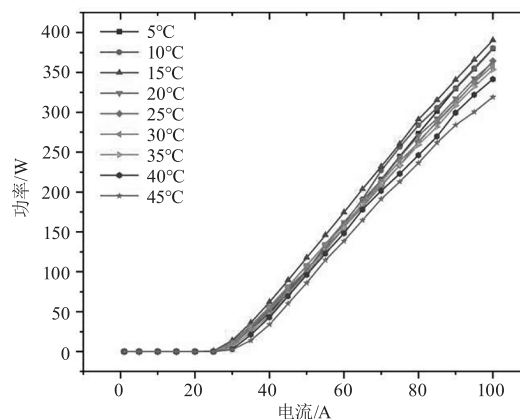
基于上述模拟结果可知,在特定工况下,3:2:1模块配置的差值为85.78 W;1:1:1模块配置的差值为42.11 W;单波长模块配置的差值为164.43 W。在Nd:YAG晶体的吸收特性方面,在804 nm~809.5 nm波长区间内,其吸收系数范围为 3.367 cm^{-1} ~ 9.217 cm^{-1} 。

4.2 脉冲功率

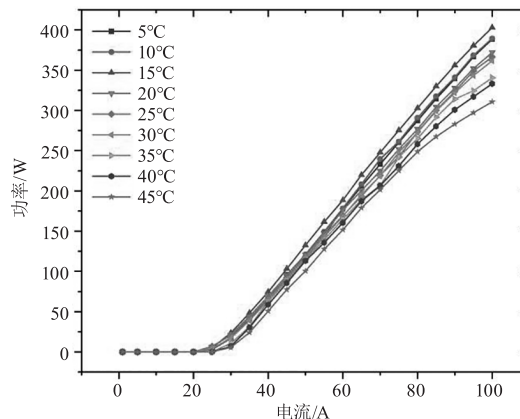
为评估非制冷激光器的性能,对三种不同泵浦模块配置的固体激光器开展输出功率测试,结果如图8所示。实验数据显示,随着泵浦电流的增加,激光输出功率呈现出线性增长趋势。当泵浦电流达到80 A时,未出现增益饱和现象,表明该激光器能稳定工作。



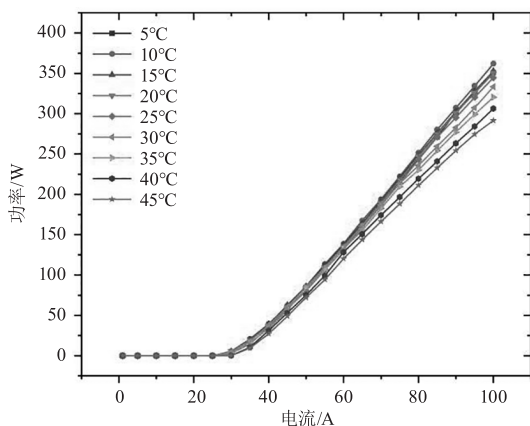
(b) 1:1:1配置 脉宽250 μs



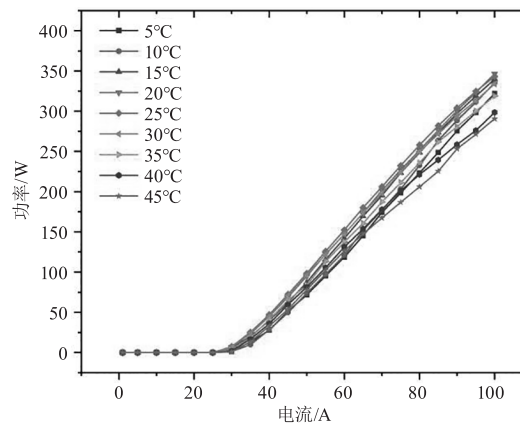
(c) 3:2:1配置 脉宽200 μs



(d) 3:2:1配置 脉宽250 μs



(a) 1:1:1配置 脉宽200 μs



(e) 单波长配置 脉宽200 μs

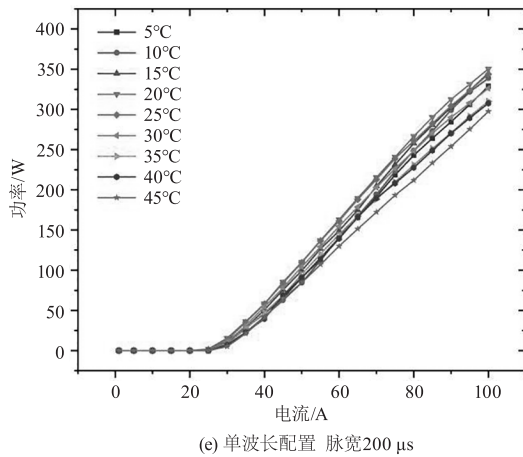


图 8 在 5 °C ~ 45 °C 内,不同比例模块、不同脉宽条件下的输出功率

Fig. 8 The output power of the module under different proportions and different pulse widths between 5 °C to 45 °C

在 5 ~ 45 °C 温度范围内,设定泵浦电流为 80 A、重复频率 20 Hz,分别针对脉冲宽度为 200 μ s 和

250 μ s 的工况,各模块所测取的最大输出功率数据列于表 1。

4.3 模块波动性对比

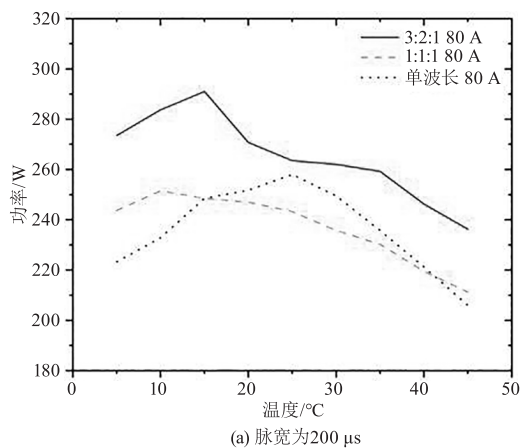
在 5 ~ 45 °C 温度范围内,针对两种不同脉冲宽度条件下的激光器输出功率展开分析。基于图 9 所示数据和表 1 中的数据进行分析与计算,所得功率波动数据呈现于表 2。

单波长模块与 Nd : YAG 晶体的吸收峰匹配度高,光谱纯度高。在部分温度范围内,该模块可实现较为优异的输出峰值功率。然而,当温度变化时,其输出功率波动较大,稳定性相较于多波长模块欠佳。这是因为单波长的中心波长随温度漂移,偏离吸收峰。而 1 : 1 : 1 和 3 : 2 : 1 模块由不同中心波长的芯片组成,温度变化时部分芯片的波长漂移能相互补偿,在一定温度范围内与吸收峰的良好匹配,所以稳定性较好。

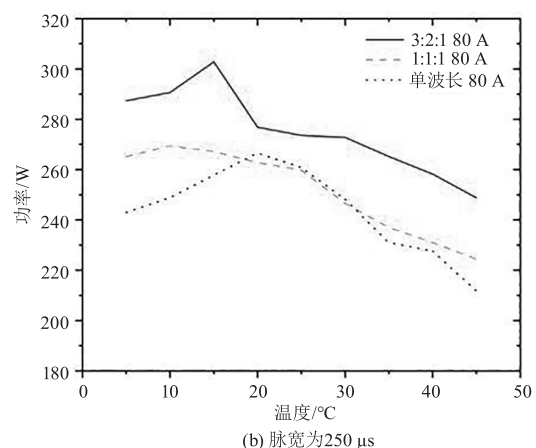
表 1 在 80 A、脉宽 200 μ s 下,不同温度下各模块的最大输出功率

Tab. 1 Maximum output power of each module at different temperatures at 80 A and 200 μ s pulse width

模块配置 脉冲宽度/ μ s 温度/(°C)	3 : 2 : 1 模块		1 : 1 : 1 模块		单波长模块	
	200 μ s	250 μ s	200 μ s	250 μ s	200 μ s	250 μ s
5	273.5	287.4	243.75	265.2	223.25	243.0
10	283.5	290.6	251.5	269.4	232.75	248.8
15	291.0	302.8	248.5	267.2	248.5	257.8
20	270.75	276.8	247.0	262.8	251.75	266.6
25	263.5	273.6	243.25	259.8	258.0	260.8
30	262.0	272.8	235.75	246.6	249.5	248.2
35	259.25	265.2	230.25	237.0	235.75	231.0
40	246.25	258.2	219.5	231.0	221.25	227.6
45	236.25	248.8	211.25	224.4	206.0	211.8



(a) 脉宽为 200 μ s



(b) 脉宽为 250 μ s

图 9 电流 80 A、不同脉宽下宽温域输出功率波动曲线

Fig. 9 Power fluctuation curve of wide temperature range output under different pulse widths and current of 80 A

表2 在80 A下,各模块在不同脉宽的波动情况

Tab.2 Fluctuations of each module at different pulse widths under 80 A

模块配置	脉冲宽度	
	200 μs	250 μs
3:2:1 模块	18.81%	17.83%
1:1:1 模块	16%	16.7%
单波长模块	20.16%	20.56%

此外,3:2:1模块的输出功率整体高于单波长模块。在低温和高温区间,1:1:1模块激光器的输出功率高于单波长模块。单波长模块在低温和高温环境下,输出功率呈现急剧下降趋势,而1:1:1模块的下降趋势较为缓和。研究表明,多波长阵列泵浦模块能在极端温度条件下确保较高且稳定的输出功率,通过设计特定配比的三波长阵列泵浦方式,可在宽温范围内能更有效提升Nd:YAG晶体的吸收率。

5 结 论

为简化温控系统的复杂性,并保障激光器在极端工作环境中能够稳定工作,设计了一种非制冷型多波长VCSEL泵浦固体激光器的方案。研究过程中,模拟了不同中心波长的VCSEL泵浦源与Nd:YAG晶体棒间的吸收率,同时模拟了该激光器在5℃至45℃温度范围内的输出功率,考虑温度波动对系统性能的影响,并据此优化波长组合的比例。在泵浦电流80 A、重复频率20 Hz条件下,针对三种不同模块配置展开测试,得到最大峰值功率及波动性。具体为3:2:1模块最大输出峰值功率分别为291 W和302.8 W,整体波动性分别为18.81%和17.83%;1:1:1模块最大输出峰值功率分别为251.5 W和269.4 W,整体波动性分别为16%和16.7%;单波长模块最大输出峰值功率分别为258 W和266.6 W,整体波动性分别为20.16%和20.56%。

实验结果表明,多波长阵列泵浦模块可在极端条件下稳定运行,能够确保较高且稳定的输出功率。此模块化设计在工业加工、科研监测及户外作业等诸多对变温环境下设备稳定性能有严格要求的应用场景中,展现出突出的工程实用价值。该设计使激光器在不同温度条件下均能提供可靠的性能,增强了其在多元环境中的应用潜力,并在一定程度上推

动了激光器高功率和小型化方向发展。

参考文献:

- [1] Liu F, Gong X, Zhang Y, et al. Research progress on 808 nm VCSEL-array-pumped solid-state lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 120001. (in Chinese)
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]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 120001.
- [2] Hengesbach S, Poprawe R, Hoffmann D, et al. Brightness and average power as driver for advancements in diode lasers and their applications [C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII. SPIE, 2015, 9348: 70–87.
- [3] Wang J, Yuan C, Li Y, et al. Direct-to-chip immersion liquid cooling for high-power vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) [J]. Applied Thermal Engineering, 2025: 126137.
- [4] Dong Tao, Song Yan, Qin Hongqi, et al. Non-temperature controlled side pumped Nd:YAG solid state laser based on multi-wavelength array [J]. Optical technology, 2022, 48(5): 531–535. (in Chinese)
董涛, 宋艳, 秦红旗, 等. 基于多波长阵列的无温控侧泵Nd:YAG固体激光器 [J]. 光学技术, 2022, 48(5): 531–535.
- [5] Zheng Yi, Gao Mingyi, Yao Jianquan, et al. Study on thermal effect of anisotropic laser medium by LD end-pumped [J]. Journal of Optoelectronic · Laser, 2003, 14(10): 1094–1098. (in Chinese)
郑义, 高明义, 姚建铨. LD端面泵浦各向异性激光介质的热效应研究 [J]. 光电子·激光, 2003, (10): 1094–1098.
- [6] Summers H D, Preston J M, Kemp A J, et al. Microchip laser with vertical-cavity surface-emitting laser diode pump [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. IEEE, 1999: 517–518.
- [7] Liu Xu, Wei Jingsong, Tan Chaoyong, et al. Theoretical analysis of multi-wavelength temperature-free-control pump source of laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 71–76. (in Chinese)
刘旭, 魏靖松, 谭朝勇, 等. 激光器免温控泵浦源的多波长选择理论 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 71–76.
- [8] Leeuwen V R, Xu B, Wang Q, et al. Passively Q-switched

- VCSEL-pumped Nd : YAG laser with 47 mJ pulse energy [C]//Solid State Laser XXVI: Technology and Devices,2017.
- [9] Yiheng Song, Xuesheng Liu, Song Yang, et al. Multiwave-length diode array end-pumped, thermally stabilized, Nd : YAG pulsed laser [J]. Laser Appl. , 2020, 32 (3) : 032028.
- [10] Zhao Meng, Li Long, Pan Xiaorui, et al. Temperature field of LD double-end pumped Nd : YAG square crystal heat capacity laser [J]. Laser & Infrared, 2018, 48 (6) : 45 – 51. (in Chinese)
赵萌, 李隆, 潘晓瑞, 等. LD 双端泵浦 Nd : YAG 方形晶体热容激光器温度场 [J]. 激光与红外, 2018, 48 (6) : 45 – 51.
- [11] Silver M, Lee S T, Borthwick A, et al. Compact, diode-pumped, solid-state lasers for next generation defence and security sensors [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 619 (1) : 012022.
- [12] Xu D. Multi-dimensional optical storage [M]. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2016.
- [13] Luo Xu, Wang Pengfei. Study on polarization coupling output characteristics of right-angle prism cavity [J]. Laser & Infrared, 2016, 46 (10) : 1244 – 1249. (in Chinese)
罗旭, 王鹏飞. 直角棱镜腔偏振耦合输出特性研究 [J]. 激光与红外, 2016, 46 (10) : 1244 – 1249.
- [14] Koechner W. Solid-state laser engineering [M]. 世界图书出版公司, 2005.