

耐高低温全功率范围可调的波长稳定半导体激光光源

张兰平^{1,2}, 蒋全伟^{1,2}, 郭林辉^{1,2*}, 叶涛^{1,2}, 谭昊^{1,2}, 傅芸^{1,2}, 王昭^{1,2}, 高松信^{1,2}¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 半导体激光器(LD)的增益谱随着加载电流和温度的变化而变化,不同功率下LD的输出波长难以稳定。功率为120 W、中心波长为809 nm的LD在10%~100%功率出光期间的波长漂移约为6 nm,这对于激光器的直接应用是不利的。目前通常采用体布拉格光栅(VBG)锁定或片上分布式反射(DBR)、分布式反馈(DFB)的方法进行波长锁定来解决该问题,但仍存在低功率下波长不稳定的缺点。为此,本文提出了一种基于“电开关选通控制+光纤合束器”的半导体激光光源方案,通过在相同电流下控制激光器的挡位来调节功率,在不增加额外光学器件的情况下达到了波长稳定的目的;该光源包含数个12 W单模块LD、数个电功能模块、控制或通信软件、半导体制冷片(TEC)控温模块、光纤合束器、光学准直镜筒;该光源的中心波长稳定在808~810 nm范围内,功率大于120 W,光斑的非均匀性(均方根) $<10\%$ 。该光源通过了高低温环境实验考核,可在-55~50 °C范围内存放及工作,同时可满足冲击振动、电磁兼容环境下的实验要求。

关键词 激光器; 波长稳定; 电开关; 分挡调节功率; 半导体激光光源

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221236

1 引言

半导体激光器(LD)具有电光效率高、体积小、重量轻等特点,在光纤激光泵浦源、工业加工、光谱分析等领域具有重要的应用价值。传统的尾纤半导体激光模块随着功率的增长(或加载注入电流增大)以及温度的变化,波长漂移较大,往往不能满足高精探测或材料高吸收、光纤通信中密集波分复用(DWDM)的要求。半导体激光的光谱受温度和注入电流的影响较大,因此往往采用原子或分子谱线实现波长锁定、体布拉格光栅(VBG)锁定、分布式反射(DBR)或分布式反馈(DFB)片上锁谱、外腔反馈的方法^[1-4],这些方法可以有效地使LD在一定温度和一定功率范围内实现波长稳定。然而,传统的波长锁定方法仍然存在全功率范围内波长不稳定的缺点,尤其是在低功率下,弱反馈会导致芯片的谐振效果不足以选择某一特定的波长。一般的半导体激光模块采用单管空间拼接的方式进行光学耦合,进而实现尾纤输出。此外,通过光纤合束的方法也能够达到光束拼接的目的,从而实现功率合成^[5-8]。

针对高功率大芯径光纤输出LD的需求,笔者提出了一种应用于高功率半导体激光光纤输出激光光源的新型波长稳定方法。在该方法中,采用最多19个单管

光纤输出的LD进行光纤合束,每个单管LD的工作温度及电流保持不变,通过开关调节LD的通断来调节输出功率,从而保证输出光的波长都在同一电流下;采用半导体制冷片(TEC)精密控温,LD的波长不会因为温度而发生漂移^[9-11]。因此,所提方法可在不同功率下实现波长稳定或一致。该方法的优势在于:1)不增加额外的VBG器件;2)通过电路、光纤合束器及TEC散热模组来控制功率,可以实现功率分挡可调,而且不同挡位下LD的工作电流和温度一致。相比于VBG、外腔^[12-15]等光学锁定,采用电学手段控制波长能够实现激光器的高电光效率输出,而且分布式散热能够将光、电、热解耦合,具有一键出光、易于维修和工程化的优点。该光源作为半导体激光直接应用光源,可在激光照明、信标、光纤激光泵浦源等领域发挥重要作用,同时为波长稳定的LD直接应用光源提供了新方法。

2 光电热一体化设计

2.1 电学设计

采用电开关控制单模块激光器出光个数,从而调谐功率。传统方法将激光器串联,同时将每个开关串联,这样在撤收加载电压时会因各个电开关不同步而导致两台激光器的电压加载到一台激光器上,从而导致这台激光器被电击穿,如图1(a)和图1(b)所示。因

收稿日期: 2022-09-13; 修回日期: 2022-10-17; 录用日期: 2022-11-16; 网络首发日期: 2022-11-26

基金项目: JKW 基础加强项目、中国工程物理研究院创新发展基金(HEL2020-03)

通信作者: *glh863@163.com

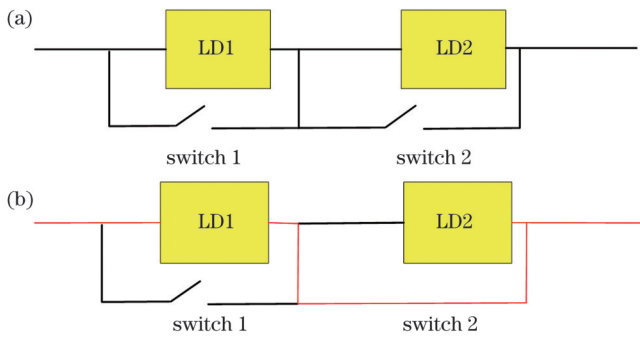


图 1 传统电连接方式以及激光器击穿原理。(a)传统电连接方式;(b)击穿原理
Fig.1 Traditional electrical connection way and breakdown principle of LD. (a) Traditional electrical connection way; (b) breakdown principle

此,对电路进行了优化,采用互不干扰的功能模块实现激光器选通控制,相当于采用多个独立的电源对 LD 进行供电,以解决激光器电击穿的问题,如图 2 所示。

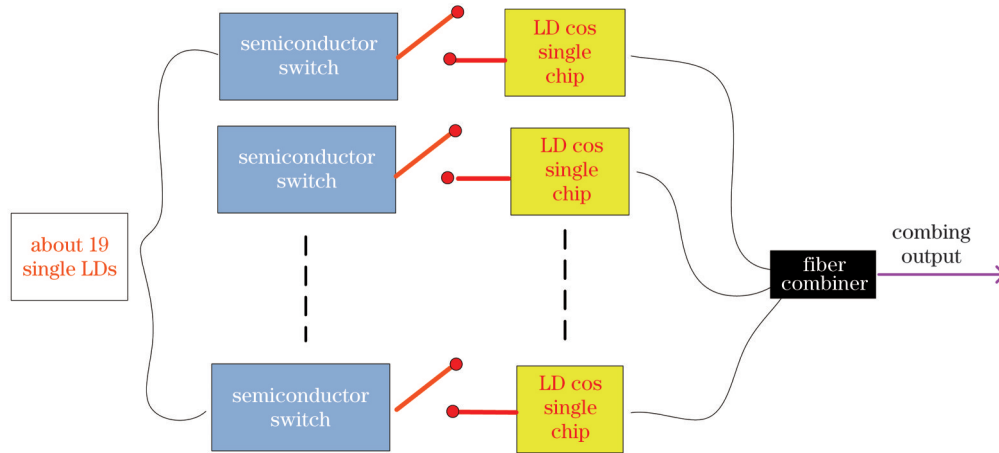


图 2 采用电功能模块对激光器供电的原理
Fig. 2 Power supply principle of laser with electric function module

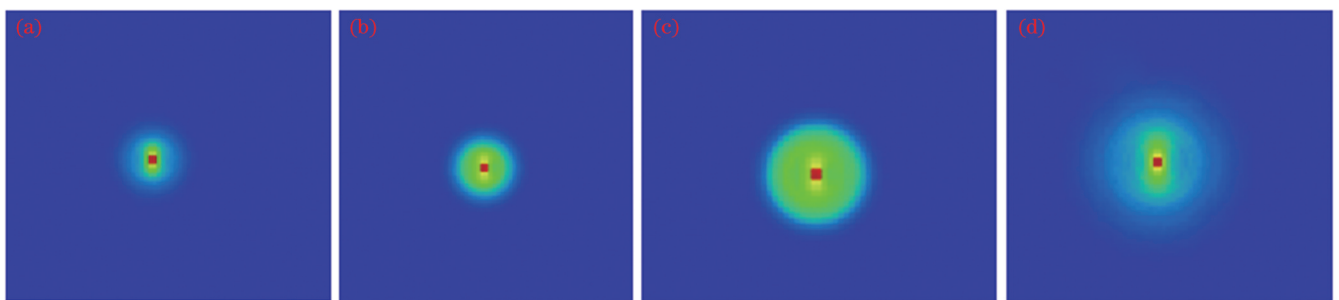


图 3 不同数目单管耦合下的输出光斑。(a) 1 个单管耦合后的输出光斑;(b) 2 个单管耦合后的输出光斑;(c) 3 个单管耦合后的输出光斑;(d) 4 个单管耦合后的输出光斑
Fig. 3 Output beam spot with different number of single tubes coupling. (a) Output beam spot with one chip coupled; (b) output beam spot with two chips coupled; (c) output beam spot with three chips coupled; (d) output beam spot with four chips coupled

根据芯片的电学参数,在最大电流 4.5 A、输出功率 12 W、中心波长 808.5 nm@28 °C TEC(半导体制冷片)条件下,对每台激光器的空间排布和光纤耦合进行了光学设计。结果发现,奇数个芯片耦合后的光斑均匀

通过电功能模块调节 LD 出光个数。电功能模块相当于一个独立的电流源,每台激光器施加相同的电流,通过控制每个电功能模块的通断来控制输出激光功率的大小,进而实现功率分挡可调,每个挡位的功率步进值为单个 LD 的功率值。这里选取每个功能模块的最大电流约为 7 A,且每个电功能模块的输出电流一样,输出功率均为 12 W 左右,波长均保持在 808 nm@28 °C。当控制 n 个($n=1, 2, 3, \dots$)电功能模块输出时,出光功率的大小为 $12 \times n$,而波长不变。

2.2 光束均匀性设计

采用光纤芯径为 105 μm 、数值孔径为 0.15~0.17 的光纤耦合模块进行 19×1 的光纤合束,输出光纤的芯径为 400 μm ,数值孔径为 0.22。利用 Zemax 软件对光纤芯径为 100 μm 、中心波长为 809 nm 的光纤耦合模块进行光学设计,设计效果如图 3 所示。采用 3 只 100 μm 条宽的芯片进行快轴堆叠,每只芯片的功率约为 4 W,耦合后的输出功率约为 12 W。

性更好。笔者模拟了 1~4 个芯片耦合后光斑的均匀性,计算结果显示 3 个单管耦合输出的光斑均匀性最好,可达到 98%。1 个、2 个、4 个单管耦合输出后的光斑均匀性在 93%~95% 之间。因此,采用 3 个单管进行光

纤耦合输出时,光斑的均匀性相对更好。

综上,利用 3 个单管进行单模块耦合设计,可使单模块的均匀性较高。为了进一步提高单模块的均匀性,在设计中减小了光束在快轴方向拼接的间距 d_1 ,提高了光束在耦合光纤端面的填充因子,这样可使光纤耦合前的光束更加均匀,从而优化设计出高均匀性的单模块光纤耦合 LD。单模块 LD 单管芯拼接示意图如图 4 所示。

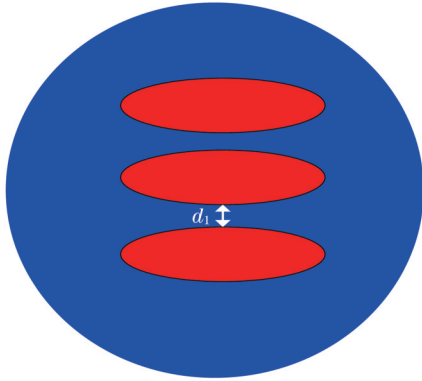


图 4 单模块 LD 单管芯拼接示意图

Fig. 4 Schematic of beam splicing in single module LD

19×1 光纤合束器光束填充示意图如图 5 所示。可以将其看成一个对称的六边形,在出光时,依次点亮 10 号、1 号+17 号、1 号+10 号+17 号……单模块激光器,对应于点亮 1、2、3……台激光器,这样便能对称地点亮激光器,从而进一步提高光束的均匀性。光纤合束器的技术参数如表 1 所示。

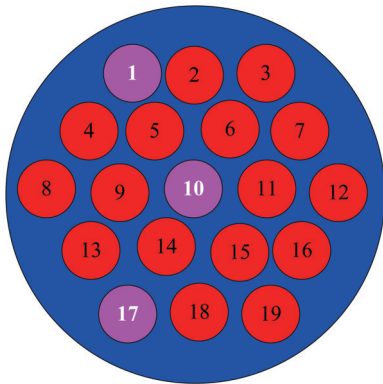


图 5 光纤合束器光束填充示意图

Fig. 5 Schematic of beam filling in fiber beam combiner

假设堆放在光纤中心外的光纤层数为 N_i ,则光纤合束器的输入臂 $N = 1 + 6 \sum_{i=1}^{N_i} i$ 。本实验采用的是 19×1 光纤,光纤层数为 2 层,光束填充示意图如图 5 所示。束参积关系须满足

$$\begin{cases} \sqrt{N} B_i \leq B_o \\ \sqrt{N} D_i NA_i \leq D_o NA_o \end{cases}, \quad (1)$$

式中: B_i 、 D_i 、 NA_i 为输入单臂光纤的束参积、芯径、数值孔

径; B_o 、 D_o 、 NA_o 为输出光纤的束参积、芯径、数值孔径。

表 1 光纤合束器参数

Table 1 Parameters of fiber beam combiner

Parameter	Value	
Specification of fiber combiner		
	19×1	
Input terminal	Numerical aperture (fiber core)	0.165 ± 0.01
		0.26
		(cladding)
	Core diameter / μm	105 ± 3
	Cladding diameter / μm	125 ± 2.5
	Coating diameter / μm	250 ± 15
Output terminal	Numerical aperture (fiber core)	0.22 ± 0.01
		0.45 ± 0.03
		(cladding)
	Core diameter / μm	400 ± 2.5
	Cladding diameter / μm	480 ± 15
Multimode transmission rate ($\times 2$)		$> 90\%$
Performance	Return light loss / dB	40
	Maximum output power ($\times 3$) / W	100
	Operating temperature / $^{\circ}\text{C}$	0-70

2.3 TEC 热匹配性设计

对 TEC 进行热匹配性设计和仿真,结果显示 6 个 TEC 制冷片可以满足散热 200 W 的需求,在 50°C 的高温环境下,激光器温度可以降低到 25°C 。

设 ΔT_m 为 TEC 的冷热面最大温差, ΔT 为设计的控温最大温差。所选 TEC 的尺寸为 $55 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$, TEC 共有 12 片,上下各 6 片。TEC 的特性如图 6 和图 7 所示。假设环境温度为 T_1 ,目标设置温度为 T_2 ,那么 TEC 的热端温度 (T_h) 和冷端温度 (T_c) 分别为 $T_h = T_1 + 15^{\circ}\text{C}$, $T_c = T_2 - 5^{\circ}\text{C}$ 。当 T_1 为 50°C 且 T_2 为 20°C 时,冷热面最大温差 $\Delta T_m = T_h - T_c = 65^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C}$ 。实验中选择 10 A 电流下制冷量为 50 W 的 TEC 产品。环境温度为 50°C 时,该 TEC 产品的能效比约为 0.3;制冷量为 200 W 时,其电功耗约为 660 W。

环境温度和目标温度的差值越大,所需电流越大,

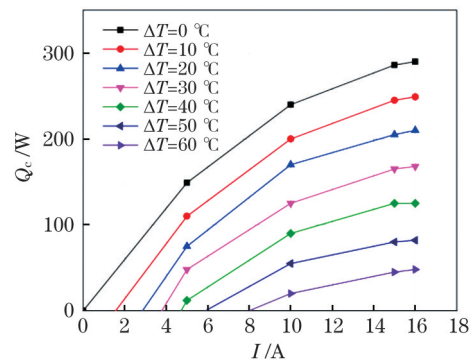


图 6 TEC 制冷量 Q_c 与电流 I 之间的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between TEC cooling capability Q_c and current I

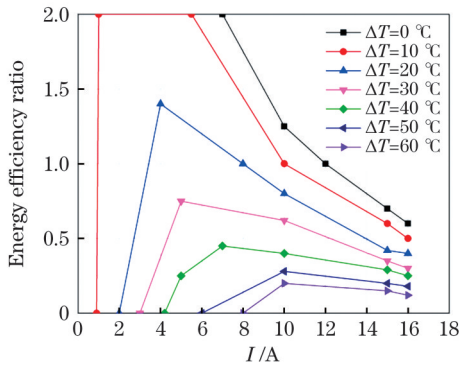


图 7 TEC 能效比与电流之间的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between TEC energy efficiency ratio and current

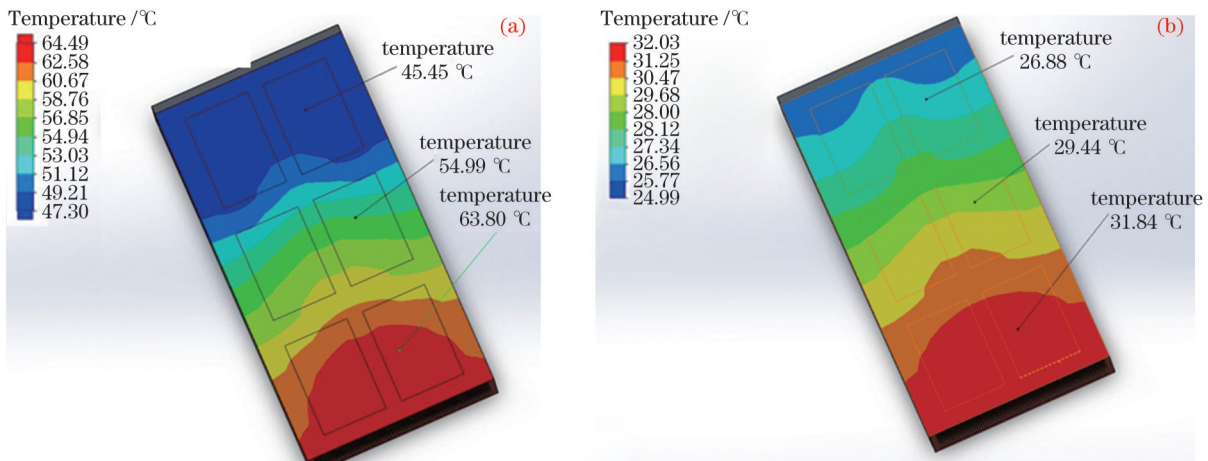


图 8 50 °C 高温环境和 25 °C 实验室环境下的 TEC 温差。(a) 50 °C; (b) 25 °C

Fig. 8 TEC temperature difference at 50 °C high-temperature and 25 °C laboratory temperature. (a) 50 °C; (b) 25 °C

采用流体-热耦合模型对“TEC+风冷”技术路线进行分析,如图 9 所示。分别分析了 2 台风机和 4 台风机的风量和 TEC 散热效果,结果如表 2 和图 10 所示。采用 2 台风机+U 形风道对 TEC 取热时,TEC 表面的平均温度为 64.6 °C;采用 4 台风机和直通风道对 TEC 取热时,TEC 表面的平均温度降低到 48.3 °C,相比前者降低了 16.3 °C,有利于控制 TEC 到目标温度。

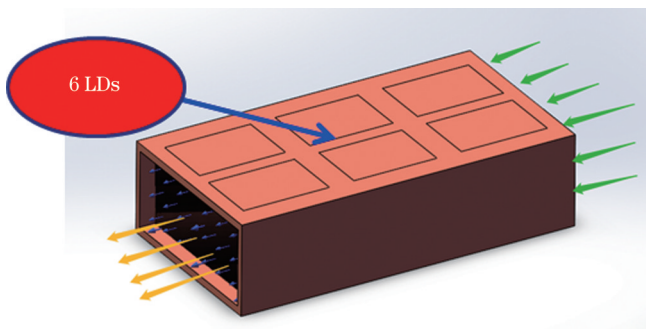


图 9 TEC 流场模拟

Fig. 9 TEC flow field simulation

与 TEC 接触的铜板经过热传导和热对流后的温度分布较为均匀,因此各个单模块的工作温度一致,从而保证了每个 LD 的工作波长一致。采用 ANSYS 热力学

能效比越低。综合考虑后,选择图 6 所示曲线的 TEC 产品。单片 TEC 的制冷量约为 25 W,其在 50 °C 时的能效比(COP)约为 0.3,在 -55 °C 时的能效比约为 4。

空气自然对流的换热系数为 3.5~6 W/m²,强迫对流的散热系数可达 35~60 W/m²,约为自然对流的 10 倍^[2]。模拟了 50 °C 高温环境和 25 °C 实验室环境下 TEC 的温度分布,结果如图 8 所示。50 °C 高温环境下,TEC 入风口和出风口位置的温度差异最大约为 18 °C;25 °C 实验室环境下,TEC 入风口和出风口位置的温度差异最大约为 5 °C。为了保证波长的一致性,必须保证 TEC 各安装区域的平均温度和平均热流密度的差异较小。因此,实验中采用风冷的方式对 TEC 带走的热量进行强迫对流,以提高散热效率。

表 2 通风量与表面平均温度的模拟结果

Table 2 Simulation results of ventilation quantity and average surface temperature

Mode	Ventilation quantity / (m ³ ·min ⁻¹)	Average surface temperature / °C
Two-fan	0.5	64.6
Four-fan	1.0	48.3
Increment	0.5	16.3

模拟得到的单模块的热分布如图 11 所示,温度分布在 25~25.8 °C 范围内,温度差异最大约为 0.8 °C,对光源的中心波长影响较小,中心波长漂移小于 0.2 nm。综上,采用 4 台风机和直通风道模式在保证各模块级中单模块工作温度恒定的同时,保证了输出激光波长的稳定性。

3 结果与讨论

3.1 指标测试

接下来进行光源的功率、光谱及光斑均匀性测试。光斑均匀性(选取光斑强度的 1/e² 处为数据采集点)的计算公式为

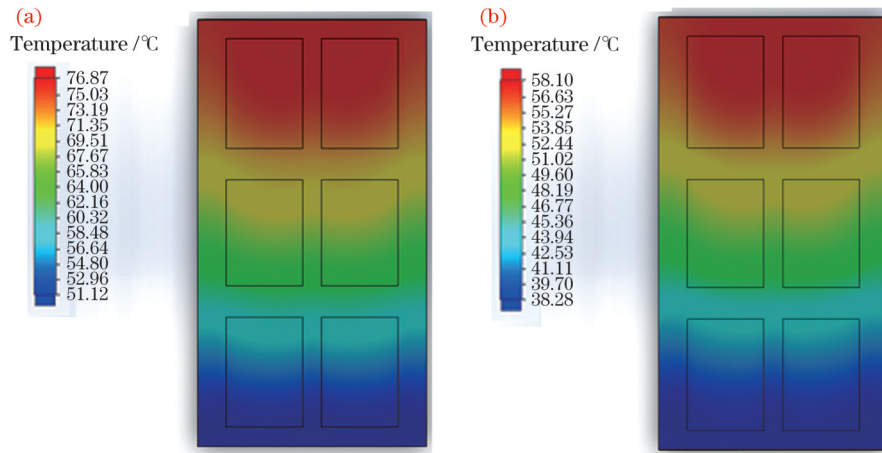


图 10 2 台风机与 4 台风机模式下的 TEC 温度分布。(a) 2 台风机模式；(b) 4 台风机模式

Fig. 10 TEC temperature distribution in two-fan and four-fan modes. (a) Two-fan mode; (b) four-fan mode

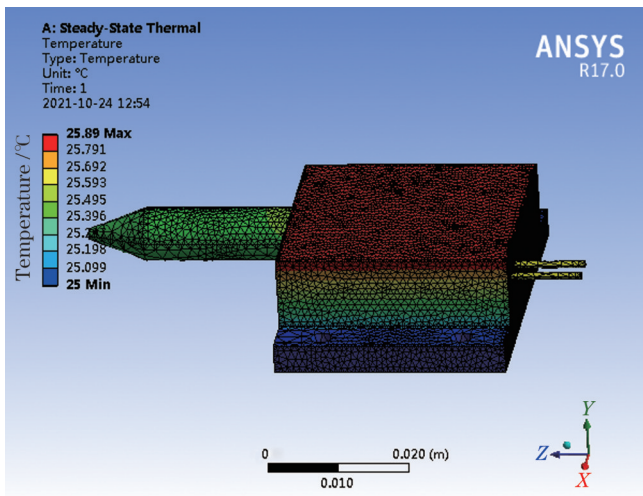


图 11 单模块 LD 的热分布

Fig. 11 Heat distribution of single module LD

$$r_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}, \quad (2)$$

式中： N 为采集点数； x_i 为数据采集点处光斑的归一化强度； \bar{x} 为归一化强度的平均值； r_s 为均匀性的均方根（RMS）值。多单管合束后的光斑均匀性在 2%~7% 之间。为了使光斑分布得更加均匀，单 LD 模块采用“等光程法”和“高填充因子光斑拼接”进行设计。此外，将光斑沿快轴方向的拼接间距缩小，也可以提高耦合输出光斑的均匀性。

同时对集成光源的每个子 LD 的散热性能进行了实验研究，实验现场照片如图 12 所示。实验结果显示，石墨纸的导热性最好。对合束器的温度进行了监测，同时采用钨铜热沉进行高效散热。

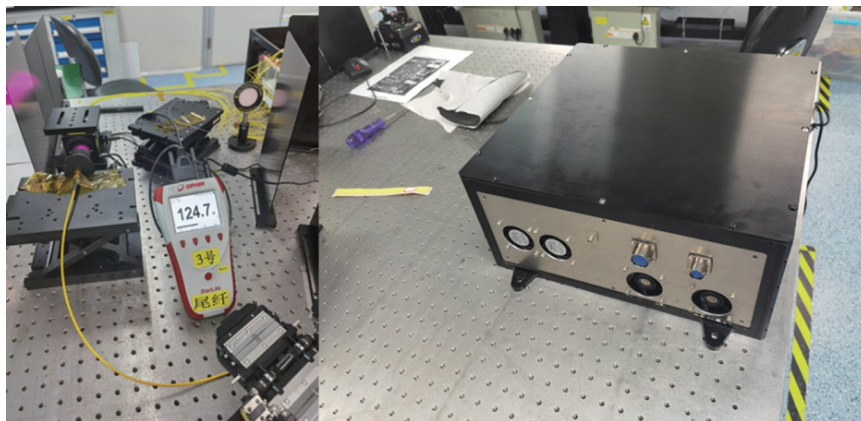


图 12 装置实物及功率测试图

Fig. 12 Physical device and power test photo

测量了输出功率和效率，结果显示，功率最大为 124.7 W，热功耗约为 143 W（设计值为 200 W），电光效率为 45%~48%，如图 13 所示。

在出光 LD 个数不同的情况下，测量了 -55~50 °C 环境温度下的光谱，中心波长及谱宽测量结果如图 14 所示。在 1~11 个 LD 出光期间，中心波长为

808~808.8 nm，波长漂移约为 0.8 nm。至此，验证了高低温环境下该光源能够在全功率范围内实现波长稳定。

同时，利用散射法测量了输出光束的均匀性。对导出的光斑数据点进行数据分析及处理，结果表明，光束的非均匀性约为 7% (<10%)，测试光斑如图 15 所示。

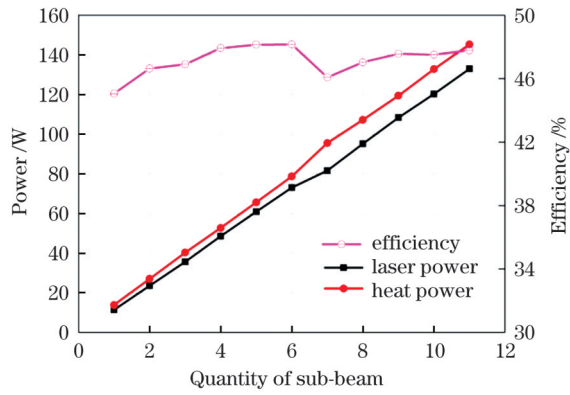


图 13 功率及效率测试曲线

Fig. 13 Measurement curves of power and efficiency

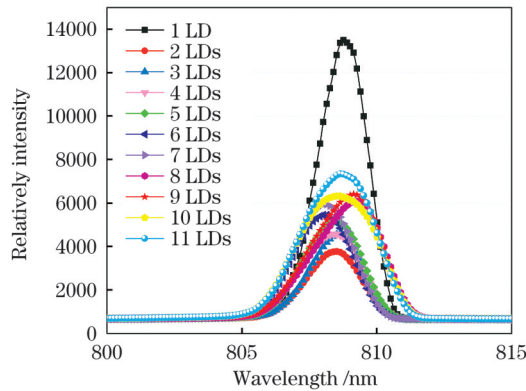


图 14 光谱测试曲线

Fig. 14 Measured spectral curves

该结果验证了单模块采用 3 个芯片进行光纤耦合、高填

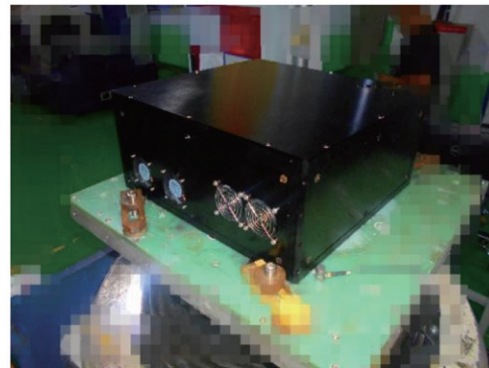
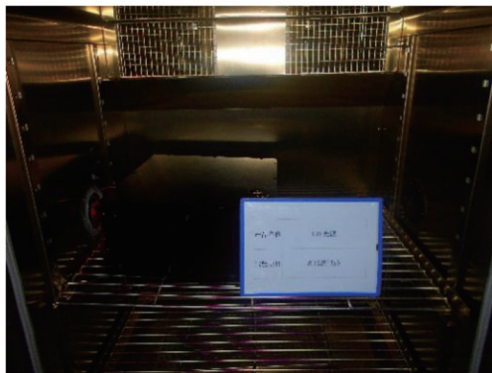


图 16 实验照片。(a) 高低温实验照片；(b) 振动实验照片

Fig. 16 Experimental photos. (a) Experimental photo of high- and low-temperature test; (b) experimental photo of vibration test

4 结 论

笔者基于“电开关选通控制+光纤合束器”的技术方法,创新性地提出了一种 LD 光源的研制方案,巧妙地利用 LD 的发光特性实现了全功率范围内的波长稳定,成功研制了 809 nm 耐高低温、功率可调、波长稳定的 LD 光源。对该光源的功率、波长、均匀性、发散角进行了测试,该光源通过了高低温、振动冲击、电磁兼容等环境适应性考核,符合设计预期,验证了所提技术方法的可行性和可靠性。本技术对于集成化、工程实

用因子光束拼接、光纤合束器对称输出的合理性。

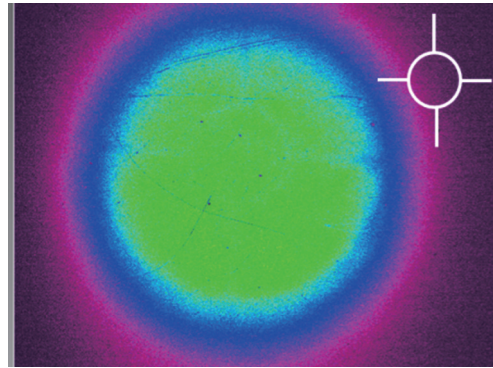


图 15 成像后的光斑测试图

Fig. 15 Spot measurement after imaging

3.2 环境实验测试

针对该光源进行了高低温、振动冲击、电磁兼容等环境实验,结果显示,该光源满足 GJB 无人机机载环境实验对热学、力学、电学方面的要求。温度、振动等实验照片如图 16 所示。

在复杂的电磁环境下,电磁辐射 CE102 和 RE102 易超标。实验测试后发现,LD 光源的 CE102 和 RE102 辐射超标频率及幅度均在可接受的范围内,且属于单个频点超标,未出现多个频点或频带超标(CE102 在单点 300 Hz 时超标量约为 4.494 dB μ V)。至此,验证了该 809 nm 中心波长 LD 光源技术路线的正确性,而且通过环境实验验证了该光源的工程实用性。

用化、紧凑化 LD 的研制及应用具有一定的参考性,目前已将 10 余套该 LD 光源应用于某装置中。

参 考 文 献

- [1] 谢建平, 王沛, 许立新, 等. 半导体激光器的波长调谐和波长稳定技术[J]. 量子电子学报, 2002, 19(2): 97-103.
Xie J P, Wang P, Xu L X, et al. Wavelength tuning and stabilizing techniques of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2002, 19(2): 97-103.
- [2] Watson S, di Gaetano E, McBrearty E, et al. Narrow linewidth distributed feedback diode lasers for cooling in cold atom systems [C]//CLEO: Applications and Technology 2020, May 10-15,

- 2020, Washington, DC. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2020: AF3I.5.
- [3] Dutta N K, Piccirilli A B, Cella T, et al. Electronically tunable distributed feedback lasers[J]. Applied Physics Letters, 1986, 48 (22): 1501-1503.
- [4] Paoletti R, Coriasso C, Meneghini G, et al. Wavelength-stabilized DBR high-power diode laser[J]. Journal of Physics: Photonics, 2020, 2(1): 014010.
- [5] Barnoski M K, Friedrich H R. Fabrication of an access coupler with single-strand multimode fiber waveguides[J]. Applied Optics, 1976, 15(11): 2629-2630.
- [6] Gonthier F. Method and device for optically coupling optical fibres: US8346038[P]. 2013-01-01.
- [7] Gonthier F. Novel designs for pump and signal fiber combiners[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7580: 758019.
- [8] 彭博, 张海涛, 闫平, 等. 熔融拉锥技术在光纤耦合传输中的应用[J]. 激光技术, 2009, 33(5): 470-472.
Peng B, Zhang H T, Yan P, et al. Fused taper technique for fiber coupling applications[J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 470-472.
- [9] 黄岳巍, 崔瑞祯, 巩马理, 等. 基于 TEC 的大功率 LD 恒温控制系统的研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 143-147.
Huang Y W, Cui R Z, Gong M L, et al. TEC based thermostat system for high-power semiconductor laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 143-147.
- [10] 李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1745-1749.
- Li J L, Shi Y B, Zhao P F, et al. Temperature control design of TEC's high precision semiconductor lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1745-1749.
- [11] 张安迪, 张艳荣, 李涛. 论域可变的模糊 PID 控制在半导体激光器温度控制系统中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1214003.
Zhang A D, Zhang Y R, Li T. Application of variable domain fuzzy PID control in semiconductor laser temperature control system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1214003.
- [12] Rein B, Walther T. Frequency stabilized diode laser with variable linewidth at a wavelength of 404.7 nm[J]. Optics Letters, 2017, 42 (8): 1508-1511.
- [13] Yeh C H, Chow C W, Wu Y F, et al. Stable wavelength-tuning laser in single-frequency by optical-injected Fabry-Perot laser diode and RSOA for long fiber distance propagation[J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 256-260.
- [14] 郭媛, 郑刚, 盛启明, 等. 一种调频连续波干涉仪激光波长稳定性测量方法[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0404002.
Guo Y, Zheng G, Sheng Q M, et al. New method for measuring laser wavelength stability by using frequency-modulated continuous wave interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0404002.
- [15] 曼玉选, 仲莉, 马骁宇, 等. 极低内部光学损耗 975 nm 半导体激光器[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1914001.
Man Y X, Zhong L, Ma X Y, et al. 975 nm semiconductor lasers with ultra-low internal optical loss[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (19): 1914001.

Stable Wavelength Diode Laser with High- and Low-Temperature Resistance Operating at Full-Power Range

Zhang Lanping^{1,2}, Jiang Quanwei^{1,2}, Guo Linhui^{1,2*}, Ye Tao^{1,2}, Tan Hao^{1,2}, Fu Yun^{1,2}, Wang Zhao^{1,2}, Gao Songxin^{1,2}

¹*Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;*

²*Key Laboratory of High Energy Laser Science and Technology, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China*

Abstract

Objective Direct diode laser has many applications, such as pump source of fiber laser, laser illumination, laser fuze, beacon laser, and wireless energy transmission. However, it is subject to low beam quality and broad spectrum, leading to limited applications at high polymer absorption, coherent light source, spectrum analysis, and industrial processing. High beam quality can be achieved by improving the chip brightness or beam combing. Single-wavelength or narrow linewidth can be achieved through volume Bragg grating (VBG) locking, distributed Bragg reflector (DBR), or distributed feedback (DFB) grating structure on a chip. Unfortunately, under low power conditions, the wavelength cannot be locked because of weak feedback. Therefore, a novel method for wavelength locking was developed using an electric switch and a fiber beam combiner to solve the problem. We developed an LD (laser diode) source comprising a single LD module, electric function module, thermoelectric (TEC) heat dissipation module, fiber beam combiner, and collimation lens barrel. An LD with power exceeding 120 W, center wavelength of 809 ± 1 nm, beam divergence smaller than 1° , spot inhomogeneity lower than 10% (root mean square) was realized. In addition, the relative environment experiments were conducted.

Methods The gain spectrum of LD changes with current and temperature. Therefore, we kept the work current and temperature constant and controlled the number of LDs to adjust power through the electric function module and fiber beam combiner. We conducted electric, optics, and thermal designs. Compared to the traditional approach, we utilized a separate power supply for each single LD to prevent extinguishing with the LD overload voltage. For the optics, a 19×1 fiber beam combiner was used to combine several LDs to achieve power combing and high uniformity. In addition, the TEC module was responsible for the heat dissipation of multiple LDs; in this manner, the maintainability of LDs which were distributed was improved. After estimation, we selected 12 pieces of $55 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ TEC coolers for refrigeration. The total cooling capacity was approximately 200 W. We designed the structure of the entire LD source. The size was approximately $420 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, and the interface included an electric component, communication module, and fiber optic flange.

Results and discussions As mentioned above, an integrated design of optics, mechanics, thermotics, and electricity was performed. Next, we demonstrated the feasibility and correctness of the design. The power was measured at -55 – 50 °C. The power value can reach a maximum of 124.7 W, and the e-o efficiency was approximately 45%–48%. The temperature of the LDs ranged from approximately 28 to 38 °C, and the wavelength drifted by approximately 2 nm. Correspondingly, it increased at 0.2 nm/°C on average (Fig. 14). The beam uniformity was tested. The inhomogeneity is 7% (RMS) lower than 10% based on the scattering image (Fig. 15). The temperature of the fiber flange was monitored in real time to guarantee usability. The temperature of the flange was lower than 80 °C, which ensured the safety of the LD source (Fig. 16). The environmental experiments of high- and low-temperature, vibration, and electromagnetic compatibility were developed. Under these conditions, the main index of the LD exhibited no abnormality, and the results demonstrated the correctness of the proposed design and product.

Conclusions In this study, we developed a novel method to stabilize the wavelength of the LD source with 12 single-LD modules of 12 W, whose spectrum was constant. The power, wavelength, beam divergence, and uniformity were measured. The power was 120 W, wavelength stability was ± 1 nm, divergence was less than 1° , and inhomogeneity was lower than 10%. The environment experiments, including high- and low-temperature, vibration, and electromagnetic compatibility, were conducted successfully. The proposed design and demonstration provide support for advancements in military-grade laser sources. Finally, more than 10 sets of the LD sources using this method have been applied in relative programs.

Key words lasers; wavelength stabilization; electric switch; tunable power by stages; LD light source