



260 W 波长锁定光纤耦合输出泵浦模块实验研究

吴华玲^{1,2}, 雷 军^{1,2}, 郭林辉^{1,2}, 王丞乾^{1,2}, 谢鹏飞^{1,2}, 刘雨萱^{1,2}, 张永刚^{1,2},
程心刚^{1,2}, 李潇潇^{1,2}, 吕文强^{1,2}, 王 昭^{1,2}, 高松信^{1,2}

(1. 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;
2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 半导体光纤耦合输出泵浦源是光纤激光器的核心器件, 其性能直接制约光纤激光器的输出水平。采用 COS 封装的高功率 LD 芯片, 通过 VBG 外腔光谱锁定和精密光束整形变换技术, 结合偏振合束与精密聚焦耦合技术将 18 个 LD 单元耦合进 105 μm /NA0.22 光纤, 获得不低于 260 W 功率输出。实验表明, 该模块在注入电流 18 A 时, 可获得稳定输出连续功率 264 W, 对应电光效率 52%, 输出光谱中心波长 975.92 nm, 谱宽 0.51 nm。该设计为获得高功率、高亮度波长稳定泵浦源提供了一条可行途径, 光纤耦合输出模块工程化后可广泛应用于光纤激光器泵浦等领域。

关键词: 半导体激光器; 光纤耦合; 波长锁定; 光束整形

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210558

Experimentation of 260 W wavelength stabilized fiber-coupled diode laser pumping model

Wu Hualing^{1,2}, Lei Jun^{1,2}, Guo Linhui^{1,2}, Wang Chengqian^{1,2}, Xie Pengfei^{1,2}, Liu Yuxuan^{1,2}, Zhang Yonggang^{1,2},
Cheng Xin'gang^{1,2}, Li Xiaoxiao^{1,2}, Lü Wenqiang^{1,2}, Wang Zhao^{1,2}, Gao Songxin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP, Mianyang 621900, China;
2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: As pump station, fiber-coupled diode laser source is one of the key elements of fiber laser, its performance restricts the output level of the fiber laser directly. Aimed at a multi-mode fiber of 105 μm core diameter and 0.22 numerical aperture, a 260 W-level high-brightness fiber-coupled diode laser model based on single-emitter-COS (chip on submount) is developed. In the design, volume Bragg grating (VBG) is used to control the spectrum of the corresponding emitter at a narrow bandwidth (about 0.5 nm), and the beam shaping technologies, polarization multiplexing and aspherical lens are taken to couple the 18 LD beams into the multi-mode fiber. The experiment indicates that, the beam shaping system can couple the 18 LD beams into the fiber, and the output power can achieve 264 W, with the E-O efficiency of 52% at operation current 18 A. Simultaneously, the central wavelength of the model is locked at 975.92 nm with an FWHM of 0.51 nm. This design offers a feasible approach to the spectral-controlled fiber-coupled diode laser. The engineered fiber-coupled diode laser system can be widely used in fiber pumping and many other areas.

Key words: diode laser, fiber coupling, wavelength-control, beam shaping

近年来固体激光发展迅速, 光纤激光器因其成本低、结构紧凑、易于维护和保障等突出优势而极受业界关注, 是目前高新技术应用发展的重点和热点方向^[1]。光纤耦合半导体激光泵浦模块(简称 LD 光纤耦合泵浦模块)是光纤激光器的核心部件, 其技术水平及可靠性指标直接制约着光纤激光器的输出性能, 高水平的 LD 光纤耦合泵浦模块是高功率光纤激光器持续稳定输出高光束质量激光的基础。因此, LD 光纤耦合泵浦模块与光纤激光器的总体设计研制具有紧密耦合关系, 其质量水平直接决定及影响着光纤激光的质量及水平, 尤其是吸收谱范围, 直接影

* 收稿日期: 2021-12-12; 修订日期: 2022-05-05

基金项目: 装备预研共用技术项目(41414060102); 基础加强项目(2020-JCJQ-245-12-03)。

联系方式: 吴华玲, wuhualing08@126.com。

响光纤激光器的稳定高效工作^[2]。典型的光纤激光器吸收谱在 976 nm 波段吸收系数是 915 nm 波段的 2~3 倍,但是吸收谱相对较窄,因此需要对输出波长进行控制。

针对 105 $\mu\text{m}/\text{NA}0.22$ 光纤耦合半导体激光泵浦模块,在目前已公布的同类型尾纤半导体激光泵浦模块中,美国 nLIGHT 公司 2020 实现了模块输出功率 363 W、效率达到 42%、质量功率比 0.44 g/W 的指标^[3],但该模块未锁定波长。国内长光华芯光电技术公司报导的 200 W 级 976 nm 波长锁定泵浦模块电光效率达到了 55%,质量 160 g^[4]。

本文设计了一种基于多单管 LD 的波长稳定光纤耦合输出模块,通过体布拉格光栅 (VBG) 外腔光谱稳定、密集光束整形与精密光束耦合技术,针对 105 $\mu\text{m}/\text{NA} 0.22$ 多模光纤可实现 260 W 级高亮度输出。在光学设计基础上利用 18 支 COS 封装的连续输出 16.5 W 激光器开展了初步实验研究,测量结果显示:目标光纤耦合输出功率达 264 W@18 A,电光效率 52%,中心波长 975.92 nm,半高宽 0.51 nm。结果表明,该方法为波长稳定的高亮度 LD 尾纤泵浦源的研制提供了一条可行的技术途径。

1 模块设计

1.1 光纤耦合理论

在激光光纤耦合光学设计中常用束参积 (Beam Parameter Product, BPP) 来进行光学计算。其物理意义在于:不考虑像差的影响,激光束在通过透镜及反射镜等光学元件时 BPP 的大小保持不变。LD 光束的束参积 BPP^[5] 定义为

$$Q = \omega_0 \theta_0 / 2 \quad (1)$$

式中: ω_0 为 LD 出射激光束束腰半径 (mm); θ_0 为 DL 出射光束的远场发散全角 (mrad)。

对于光纤 (D 为光纤芯径,单位为 μm ; NA 为光纤数值孔径,对应光纤允许的最大入射角度的正弦值) 耦合输出激光器系统而言,光束 BPP 调整及整形耦合技术是整个系统的关键技术和难点。二极管激光光束传输及光纤耦合全过程应满足以下公式^[6]

$$Q_{\text{DL}} = \sqrt{Q_{\text{F}} Q_{\text{S}}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{O}} = D \cdot NA / 2 \quad (3)$$

$$Q_{\text{DL}} \leq Q_{\text{O}} \quad (4)$$

式中: Q_{LD} 为二极管激光器的束参积 ($\text{mm} \cdot \text{mrad}$); Q_{S} 为二极管激光束慢轴方向的束参积 ($\text{mm} \cdot \text{mrad}$); Q_{F} 为二极管激光束快轴方向的束参积 ($\text{mm} \cdot \text{mrad}$); Q_{O} 为耦合用光纤的束参积 ($\text{mm} \cdot \text{mrad}$)。

光纤耦合输出激光束的亮度公式

$$B = \frac{P}{\pi^2 Q_{\text{O}}^2} \quad (5)$$

式中: B 为二极管激光器光纤耦合输出激光束亮度值 ($\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$); P 为光纤输出功率值 (W)。

1.2 总体光学设计

采用窄条宽 (120 μm 发光宽度) 的高亮度单管 LD 芯片作为子单元,参数如表 1 所示,结构上通过精细交叉式光路设计,光学上结合空间合束及偏振合束方式实现功率倍增,采用优化的非球面聚焦系统,实现与目标光纤的高效率光纤耦合输出。模块的波长稳定控制通过 VBG 对每个 LD 单独进行外腔波长锁定实现,光纤耦合 LD 模块输出 976 nm 波长稳定激光。

表 1 单管芯片的主要特性参数 (25 $^{\circ}\text{C}$)

Table 1 Main parameters of the LD chip (25 $^{\circ}\text{C}$)

emitter contact width/ μm	cavity length/mm	$\theta_{\parallel}/(^{\circ})$	$\theta_{\perp}/(^{\circ})$	centroid wavelength/nm	power@18 A/W
120	4	9(95% energy)	52(95% energy)	976 \pm 3	>16.5

精细交叉式光路设计布局如图 1 所示,相对目前典型分离式光路布局,该设计光路紧凑,可有效缩短光程,提高光纤耦合效率及 NA 含能比。

1.3 波长稳定设计

目前改善 DL 输出光谱特性主要有三种方法:增益反馈布拉格 (DFB) 激光器、闪耀光栅和反射式布拉格体光栅 (VBG)。DFB 激光器在芯片结构上制备光栅,存在工艺难度高、光谱温漂系数大 (0.07 nm/ $^{\circ}\text{C}$) 的缺点;闪耀光栅外腔半导体激光器反馈效率较低 (目前报道最高效率为 70% 左右),且反馈效率受热影响较大;反射式 VBG 由于其

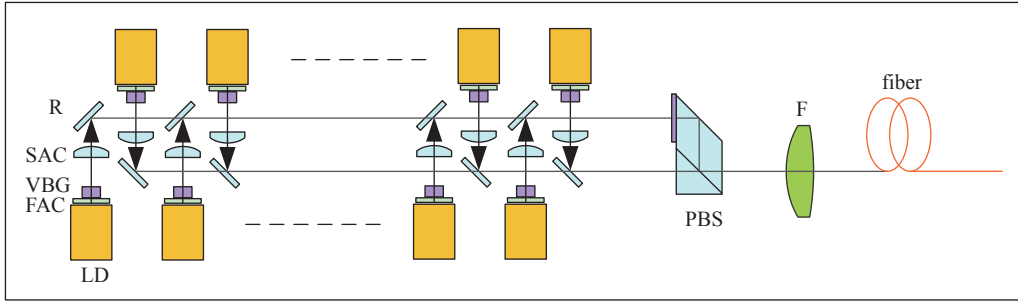


Fig. 1 Optical system design

图1 光路布局

热稳定性好、高损伤阈值、线性传输特性等优点,近年来成为改善 DL 输出光谱特性的首选器件^[7]。因此,本设计中波长稳定控制通过外腔 VBG 反馈实现。VBG 外腔反馈是利用反射式 VBG 的窄衍射带宽,将其安装在经过准直后的激光器芯片前端,如图 2 所示,与激光芯片后腔面构成谐振腔,利用 VBG 的衍射光作为种子光进行谐振,输出激光光谱由 VBG 决定,典型光谱谱宽可压窄至 0.1 nm、温度漂移 0.01 nm/°C^[8]。VBG 锁定前后光谱如图 3 所示。通过 VBG 器件的选型设计实现目标波长 (976 nm) 的高效率锁定,能量损失预估为 3%~8%,则要求单元 COS 的原始功率应不低于 16.5 W, VBG 锁定后输出功率不低于 16 W,光谱宽度小于 1 nm (FWHM)。光纤耦合系统光效率约 86%,当 LD 芯片的电光效率为 62% 时,则整个光纤耦合半导体激光泵浦模块的电光效率可达 53%。

1.4 准直合束设计

由于 LD 正交两个方向的发散特性差异很大,所以采用柱面镜分别对快慢轴进行准直。快轴方向由于发射 NA 非常大,必须用非球面柱面镜才能实现大 NA 光束的准直。一般使用商用标准 FAC 镜进行 LD 光束的快轴准直, FAC 镜参数的选择应结合所使用芯片的快轴发散角与所设定的 FAC 准直后的光束尺寸确定,同时还需根据合束间隔进行优化调整,以防出现严重的挡光与漏光问题。考虑市场上的成熟产品规格,本设计中选择焦距为 0.3 mm 左右的 FAC 准直镜,慢轴采用自行设计的焦距 16 mm 的柱面镜进行准直。准直模拟仿真效果如图 4 所示。

在合束方面,采用空间合束结合偏振合束实现功率提升。18 个 LD 单元分为两排交错封装以充分利用空间,快慢轴准直后采用 45° 反射镜结合台阶实现单偏振 9 个 LD 单元的光束沿快轴方向合束。两路单偏振光使用组合式偏振器件合成,组合式偏振合束器件由半波片与 PBS 组合而成,有利于提高模块可靠性。组合式偏振合束器件如图 5 所示。

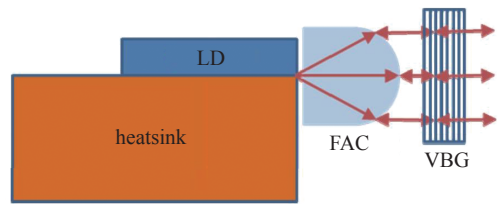


Fig. 2 The principle of VBG wavelength-control

图2 VBG 锁定原理

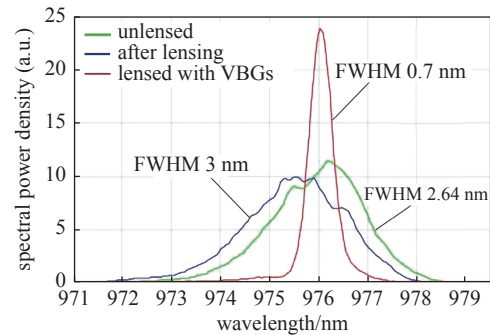


Fig. 3 The spectrum with/without VBG wavelength control

图3 VBG 波长锁定前后光谱

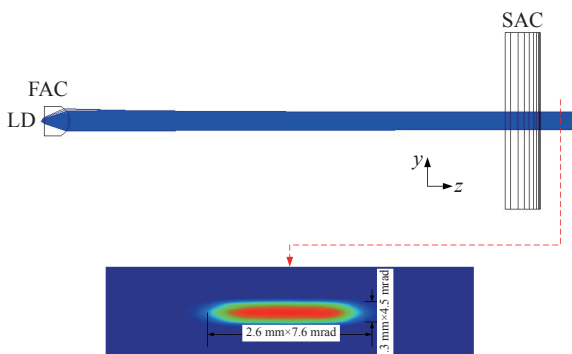


Fig. 4 Beam collimation

图4 光束准直

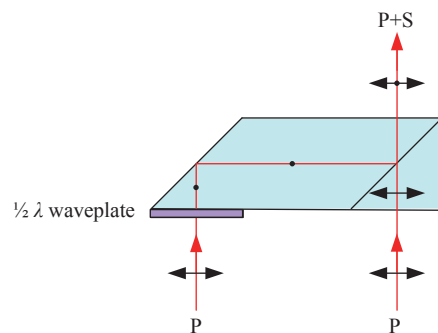


Fig. 5 Polarization complexing system

图5 偏振合束

1.5 耦合聚焦设计

在对光束聚焦时,要求聚焦光斑很小,如果聚焦时产生球差,会使聚焦光斑尺寸大于光纤芯径,从而降低耦合效率。光束聚焦时必须进行消球差,因此消球差聚焦透镜为整套耦合系统的设计关键,目前组合透镜组或非球面透镜能均能较好实现该功能,非球面透镜以其容易装调、结构简单常被优先选择。本方案选择焦距 12 mm 的商用成品非球面透镜 (lightpath 354058-B)。

1.6 结构设计

基于交叉紧凑光路空间优化布局,针对高功率半导体激光器高效热管理技术需求,开展了 LD 激光器热控一体化设计,分析了高功率下管壳结构的散热性能,实现高功率半导体激光器轻质、高效的热控一体化设计,获得光纤耦合泵浦模块的结构实物设计如图 6 所示,模块外观尺寸约为 133.8 mm×58 mm×20.5 mm。

电输入采用图 6 所示的纯铜镀金圆柱作为泵浦源的电极,要求承载 18 A 以上电流。考虑电流承载能力与电极材料强度,选择直径为 3 mm 的纯铜镀金圆柱作为输入电极。

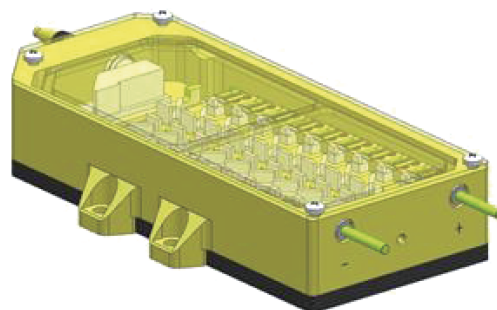


Fig. 6 Structure design of fiber coupling module
图 6 光纤耦合模块实体结构设计

2 实验验证

2.1 单元芯片封装

针对单管芯片进行 COS 结构封装,测试结果表明, COS 级 LD 在 18 A 电流驱动时,可输出约 16.5 W 的功率,电光效率 61%~62%。

2.2 VBG 装调

在装调 FAC 后下一步骤为 VBG 装调。在使用 VBG 进行波长锁定时,由于衍射效率损耗,会造成额外的功率损失。基于 10% 衍射效率的 VBG 波长锁定实验,得到了 18 A 电流驱动下波长锁定后功率耦合效率平均值约为 97%,如表 2 所示。

表 2 波长锁定前后功率传输效率
Table 2 Transmission efficiency of VBG

power/W	wavelength/nm	power/W	wavelength/nm	FWHM/nm	transmission efficiency of VBG/%
free-running		lensed with VBG			
16.62	977.30	16.12	975.34	0.49	97.0
16.57	975.48	16.02	975.34	0.50	96.7
16.58	977.72	16.04	975.34	0.51	96.7
16.44	977.58	15.91	975.34	0.49	96.8
16.60	977.72	16.14	975.34	0.49	97.2
16.61	977.86	16.11	975.20	0.48	97.0
16.47	977.86	16.02	975.20	0.49	97.3

2.3 模块集成与测试

该 105 μm 光纤耦合半导体激光泵浦模块采用 9+9 多单管双排交错排布光学耦合整形技术路线,针对 105 μm /NA0.22 光纤实现了连续输出功率 264 W 的功率输出,电光效率 52%,中心波长 975.92 nm,波长半高宽 0.51 nm。模块测试如图 7 所示,输出特性如图 8 所示。

由输出特性曲线可知,随注入电流的增加,光纤耦合输出功率呈线性增长趋势,说明激光器芯片本身的功率增长特性良好,且耦合系统参数匹配合理,耦合效果较好。注入电流在 8 A 附近时光纤耦合输出模块的电光效率达到最高值,

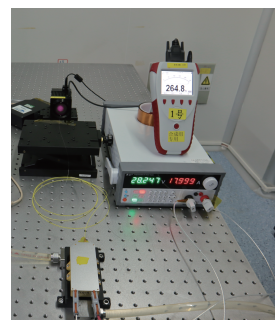


Fig. 7 Testing of output power and spectrum
图 7 功率与光谱测试

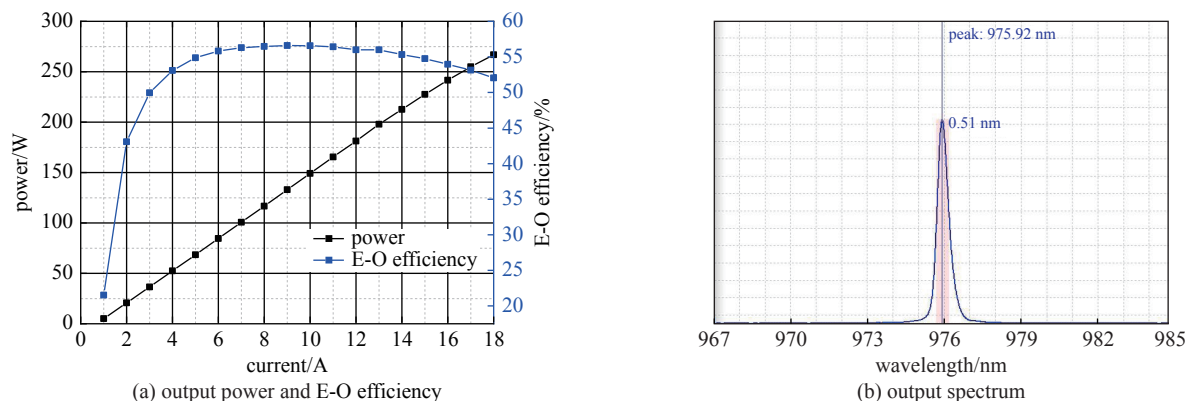


Fig. 8 Output curves

图 8 模块输出特性曲线

此后平缓下降,符合半导体激光芯片的输出特性。在注入电流 18 A 时,输出功率 264 W,电光效率 52%,与理论计算的 53% 的电光效率的差异在于光纤输出端为切割端,存在 3%~4% 的非涅尔反射损失。实验进一步验证了设计的准确性与有效性。

3 结论

本文采用 COS 封装的高功率 LD 芯片,通过 VBG 外腔光谱锁定和精密光束整形变换技术,结合偏振合束与精密聚焦耦合获得 260 W 高亮度耦合输出,验证了 VBG 波长锁定效果,为获得高功率、高亮度波长稳定泵浦源提供了一条可行途径。该项技术后续研究的重点在于提高模块的环境适应性,拓展其应用领域。该光纤耦合输出模块工程化后可广泛应用在光纤激光器泵浦等领域。

参考文献:

- [1] Savich M. High power tube solid-state laser with zigzag propagation of pump and laser beam[C]//Proceedings of SPIE 9342, Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices. 2015: 934216-1-934216-9.
- [2] 王运谦, 刘朗, 黄茂全, 等. 大口径管状 Nd: YAG 放大器[J]. 激光与红外, 2003, 33(4): 246-248. (Wang Yunqian, Liu Lang, Huang Maoquan, et al. Tubular Nd: YAG amplifier of big caliber[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(4): 246-248)
- [3] Kanskar M, Bai C, Bao L, et al. High brightness diodes and 600W 62% efficient low SWaP fiber-coupled package[C]//Proceedings of SPIE 11262, High-Power Diode Laser Technology XVIII. 2020: 112620A.
- [4] 新一代激光器理想泵浦源[EB/OL]. <http://mbd.baidu.com/Newpage/data/landingsuper>. (Ideal pump source of new generation laser[EB/OL]. <http://mbd.baidu.com/Newpage/data/landingsuper>)
- [5] Liu Youqiang, Cao Yinhua, Cao Jing, et al. The research of fiber-coupled high power diode laser[C]//Proceedings of SPIE 8192, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Laser Sensing and Imaging; and Biological and Medical Applications of Photonics Sensing and Imaging. 2011: 81922X-1-10.
- [6] 高欣, 薄报学, 乔忠良, 等. 多线阵半导体激光器的单光纤耦合输出[J]. 光子学报, 2010, 39(7): 1229-1234. (Gao Xin, Bo Baoxue, Qiao Zhongliang, et al. Single fiber coupling of multi-linear-array-diode-lasers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(7): 1229-1234)
- [7] 蒲世兵, 姜宗福, 许晓军. 基于体布拉格光栅的光谱合成的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(5): 721-724. (Pu Shibing, Jiang Zongfu, Xu Xiaojun. Numerical analysis of spectral beam combining by volume Bragg grating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(5): 721-724)
- [8] 辛国锋, 程灿, 瞿荣辉, 等. 体布拉格光栅外腔半导体激光器光谱特性研究[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1821-1826. (Xin Guofeng, Cheng Can, Qu Ronghui, et al. Study of spectral characteristics of external-cavity semiconductor laser a volume Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 27(10): 1821-1826)