

基于光谱合束的 800 nm 高亮度半导体激光源

张俊, 彭航宇*, 付喜宏, 秦莉, 宁永强, 王立军

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 高功率 800 nm 波段半导体激光器是远距离照明的优选光源之一, 但受光束质量及亮度限制, 难以远距离传输, 提升高功率 800 nm 半导体激光器的光束质量及亮度是关键。光谱合束方法在保持激光单元的光束质量时, 提高了激光功率和亮度。基于光谱合束方法, 结合芯片增益光谱来优化合束谱宽和结构, 耦合 10 个 800 nm 激光线阵, 研制出连续功率为 363.5 W, 光束质量为 4.17 mm·mrad, 亮度为 212 MW/(cm²·sr) 的激光源, 电光转换效率为 40%。通过进一步结构优化及偏振合束, 有望获得千瓦级的高功率 800 nm 半导体激光, 为远距离激光照明提供高性能光源。

关键词 激光物理; 半导体激光器; 光谱合束; 高光束质量; 高亮度; 远距离激光照明

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0701021

High-Brightness 800-nm Semiconductor Laser Source Based on Spectral Beam Combining

Zhang Jun, Peng Hangyu*, Fu Xihong, Qin Li, Ning Yongqiang, Wang Lijun

State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Jilin, Changchun 130033, China

Abstract High-power semiconductor lasers operating at a wavelength of 800 nm are one of the preferred laser sources for long-distance illumination. However, owing to poor beam quality and brightness, it is difficult for 800-nm semiconductor lasers to transmit over long distances. Therefore, it is essential to improve the beam quality and brightness. For spectral beam combining method, the output power and brightness are improved while preserving the beam quality of a laser unit. Based on this method, a high-power laser source comprising 10 800-nm laser arrays is developed by optimizing the spectral width and the combining structure according to the gain spectra of laser bars, with a continuous power of 363.5 W, beam quality of 4.17 mm·mrad, brightness of 212 MW/(cm²·sr), and electro-optic conversion efficiency of 40%. Through further structural optimization and polarization coupling, a kW-class high-power 800-nm semiconductor laser can be obtained, providing a high-performance laser source for long-distance laser illumination.

Key words laser physics; semiconductor laser; spectral beam combining; high beam quality; high brightness; long-distance laser illumination

OCIS codes 140.2020; 140.3298; 140.3290

1 引 言

800 nm 波段半导体激光器是激光照明的主要光源之一, 配合红外成像设备, 可实现夜间目标指示与观测, 广泛应用于安保、野外搜救等领域。为了增加作用距离, 要求 800 nm 半导体激光器具有高功率、高

光束质量及高亮度特性。通过集成多个 800 nm 激光单元可实现高功率, 但光束质量会降低、激光发散快、作用距离受限, 制约了其在远距离照明领域的应用。因此, 如何获得高功率、高光束质量、高亮度的 800 nm 波段激光是亟待突破的关键。美国 nLight 公司报道, 通过空间及偏振合束, 在 793 nm 波段, 光纤芯径为

收稿日期: 2020-03-18; 修回日期: 2020-04-01; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 科技部重点研发计划(2018YFB1107303)、国家自然科学基金(61991433, 61535013)、吉林省科技发展计划(20190302042GX)、中国科学院前沿科学重点项目(QYZDY-SSW-JSC006)、装备预研领域基金(61404140107)

* E-mail: penghy@ciomp.ac.cn

0701021-1

200 μm 、数值孔径(NA)为 0.17 的光纤能输出功率 185 W,并预计光纤芯径为 105 μm 、NA 为 0.15 的光纤可输出功率 95 W^[1],对应亮度分别为 6.49 MW/($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)和 15.54 MW/($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$),是该波段所报道的最高亮度,但远不及红外波段半导体激光器的 1000 MW/($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)量级亮度水平^[2],800 nm 波段激光单元功率低,所采用的合束技术也直接限制其光源性能的提升。

光谱合束技术是实现高功率、高光束质量、高亮度激光的有效途径之一,通过外腔反馈光谱锁定、光栅分光及合束,可使合束功率为单元功率之和,并且合束光束质量与单元质量保持一致,激光亮度得到数倍提高^[3]。光谱合束技术已成功应用于红外波段的半导体激光器中^[2,4-6],并将半导体激光功率及亮度提升至 CO₂ 激光器的水平。基于该技术,美国 Teradiode 公司开发出功率为百瓦至近万瓦量级的光源样机,Trumpf 公司也报道芯径为 200 μm 的光纤输出连续功率达 5 kW^[6],国内也开展了关于光谱合束 900~1000 nm 波段激光器的研究^[7-9]。受应用场景及 800 nm 波段半导体激光器性能影响,关于光谱合束 800 nm 波段激光器鲜有报道。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所前期报道了光谱合束 800 nm 波段激光器^[10-11],该激光器能实现功率为百瓦量级的高光束质量合束光输出,单外腔镜光谱合束结构最高为 4 个线阵。

为了提高 800 nm 波段半导体激光器的功率及亮度,通过结合芯片增益光谱、优化光谱合束结构及单元谱宽等,实现了具有 10 个 800 nm 激光线阵的单外腔镜,整体谱宽为 27.3 nm,输出连续功率为 363.5 W,光束质量为 4.17 mm·mrad,电光转换效率为 40%,亮度达到 212 MW/($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$)。若进一步增加驱动电流,并结合偏振合束,有望实现千瓦量级的高光束质量 800 nm 激光源,为远距离激光照明提供高功率、高亮度激光源。

2 实验设计

光谱合束结构如图 1 所示,所采用的色散元件为透射光栅(transmission grating),半导体激光线阵(LDA)上每个激光单元(emitter)的后腔面(rear facet)与外腔镜(output coupler)各自组成独立的谐振腔,通过共同的光栅和外腔镜作用,各个激光单元在外腔镜处以近场和远场相重合的方式谐振输出。为了减小腔内其他耦合腔效应,均对腔内的光学元件及激光线阵的前腔面镀增透膜。

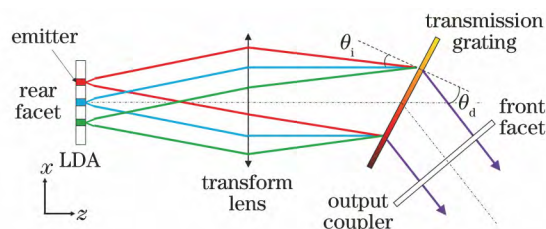


图 1 基于透射光栅的光谱合束结构

Fig. 1 Structure of spectral beam combining based on transmission grating

所有激光单元谐振均满足透射光栅的光栅方程:

$$m \cdot \lambda_i = \Lambda \cdot (\sin \theta_i + \sin \theta_d), \quad (1)$$

式中:对于透射式一阶衍射光栅, $m = -1$; Λ 为光栅的空间周期; θ_i 为光栅入射角; θ_d 为光栅衍射角; λ_i 为起振波长。对于透射光栅,当 $\theta_i = \theta_d = \theta_{\text{littrow}}$ 时,光栅获得最佳衍射效率,此时角度为 θ_{littrow} 。

只有垂直入射到外腔镜并能够反馈回到原激光单元的光才能起振,则所有激光单元的光沿相同方向衍射,即所有起振激光波长在光栅上具有相同的衍射角 θ_d 。由于所有单元的空间位置不同,光经变换透镜后以不同的角度入射到光栅上,则腔内的每个激光单元谐振波长被调节至不同值 λ_i ,整体合束光谱被扩宽。

根据光栅色散,合束激光的谱宽 $\Delta\lambda$ 变为

$$\Delta\lambda = \frac{\Lambda \cdot d}{f_c} \cdot \cos \theta_{\text{littrow}}, \quad (2)$$

式中: d 为激光光谱合束光斑沿 x 方向的整体尺寸; f_c 为变换透镜的焦距。实验所采用的激光巴条的参数如表 1 所示,其中, θ_{slow} 为慢轴方向的发散角, θ_{fast} 为快轴方向的发散角,偏振态为横电(TE)模式。

表 1 800 nm 半导体激光巴条的结构参数

Table 1 Structural parameters of 800 nm semiconductor laser bar

Parameter	Content
Wavelength	800 nm
Chip width	10 mm
Cavity length	2 mm
Number of emitters	19
Emitter pitch	500 μm
Emitter width	100 μm
θ_{slow} (95% power content)	8°
θ_{fast} (95% power content)	50°
Front facet reflectivity of bar	<0.5%
Rear facet reflectivity of bar	95%
Polarization	TE

激光巴条经传导热沉封装的激光线阵直接输出

的特性^[12-13]如图 2 所示,热沉温度为 20 °C,由于前腔面镀增透膜,谐振腔损耗大,谐振阈值较高,达 15 A,斜率效率为 1.04 W/A,50 A 电流驱动下输出功率为 35.2 W,最高电光转换(E-O)效率为 39.3%。

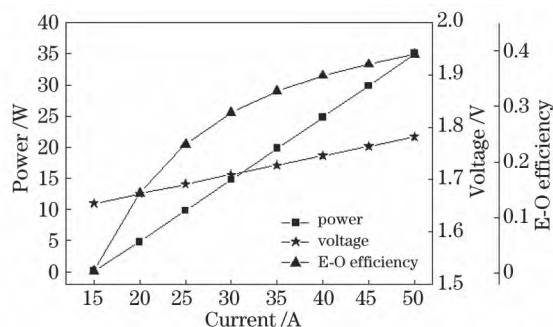


图 2 单个 800 nm 半导体激光线阵的功率、电压及 E-O 效率随电流变化曲线

Fig. 2 Power, voltage, and E-O efficiency versus current of single 800 nm semiconductor laser array

在 20 A 电流驱动下,采用积分球收光,测试输出光谱特性,结果如图 3 所示,中心波长为 794 nm,在 780.0~802.5 nm 宽谱段内存在一定增益,这为后续光谱锁定范围提供了参考。

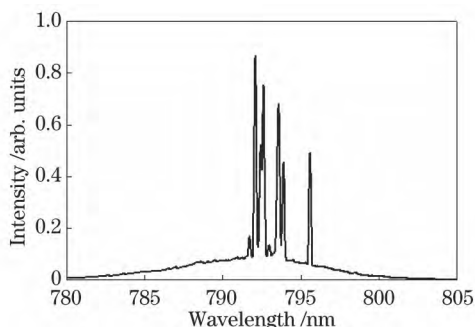


图 3 单个 800 nm 半导体激光线阵的光谱特性
Fig. 3 Spectral characteristic of single 800 nm semiconductor laser array

所采用的透射光栅的线数为 1765 line/mm,波长为 808 nm, θ_{littrow} 为 44.93°,色散为 2.49 mrad/nm,TE 线偏振光的一级衍射效率最高为 94%,在 770~830 nm 波段的一级衍射效率大于 90%,如图 4 所示。

为了实现 10 个激光线阵的有效谐振,要求每个被锁定的波长必须在激光芯片有效增益谱段内。基于激光线阵的光谱特性,单线阵光谱宽度应被压缩至 2.0 nm 以下,在此采用焦距 f_c 为 1.9 m 的长焦变换透镜进行光束变换,经(2)式计算,得单线阵带宽 $\Delta\lambda$ 为 1.90 nm。

在水平面上对 10 个激光线阵进行平铺固定,通

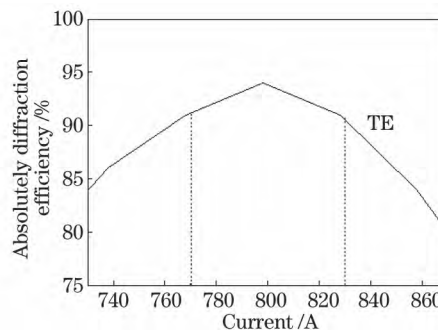


图 4 透射光栅的-1 级衍射效率

Fig. 4 -1 order diffraction efficiency of transmission grating

过各自的小反射镜调整光轴指向,如图 5 所示,各激光线阵与外腔镜之间等光程,其中 a 为单个激光线阵在光谱合束方向的尺寸。考虑线阵之间存在一定的不发光区,其在光谱合束方向的尺寸为 Δa ,根据(2)式可知,此区域会占据合束光谱资源,为了将 10 个激光线阵的整体光谱压缩在激光芯片的有效增益内,尽量减小线阵之间的不发光区。由于空间结构的限制,将 Δa 设计为 2 mm,则整个光斑尺寸 d 为 118 mm。将整体谱宽 $\Delta\lambda$ 设计为 24.9 nm,略大于激光芯片的增益带宽,需通过后续处理来匹配两者。为了实现有效反馈,选用反射率为 10%的平面镜作为外腔镜。

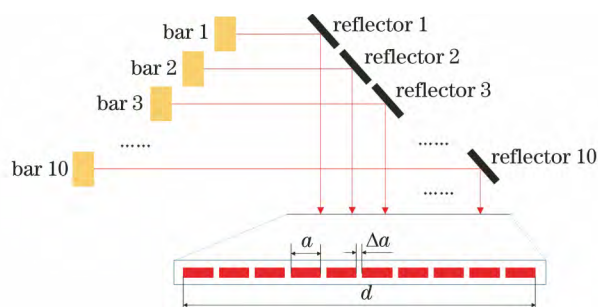


图 5 10 个 800 nm 半导体激光线阵空间排列结构示意图
Fig. 5 Schematic of spatial arrangement structure of ten 800 nm semiconductor laser arrays

3 实验结果与讨论

为了实现有效谐振,通过调温增加芯片的等效增益带宽,将参与合束的 10 个激光线阵分成 3 组进行制冷,将短波的 3 个线阵热沉温度调节至 5 °C,中间波长的 4 个线阵热沉温度调节至 15 °C,长波的 3 个线阵热沉温度调节为 25 °C,分别往长波和短波方向延展增益带宽。在 50 A 电流驱动下,10 个线阵光谱合束后的输出光谱如图 6 所示。可以看出,10 个间隔分明的光谱包络对应 10 个激光线阵,每个线阵均有效谐振,整体谱宽为 27.3 nm,光谱覆盖

777.0~804.3 nm,与调温后的增益谱相匹配。由于激光芯片的有效增益光谱偏向短波,为了实现各个激光单元的有效谐振,调节透射光栅和外腔镜角度,将谐振光谱整体往短波移动,中心波长偏移至790.65 nm。另外,处于短波的四个光谱包络间隔明显偏大,这也导致整体谱宽大于设计值 24.9 nm。从图 6 还可看出,在 800 nm 处有较高的谐振峰值,往两侧移动时增益峰值均减小,这主要由芯片增益、衍射光栅效率及谐振腔反馈等因素共同决定。

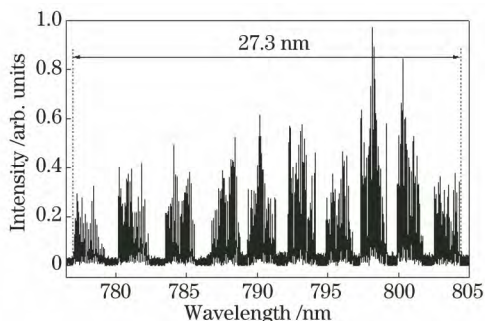


图 6 10 个 800 nm 半导体激光线阵光谱合束后的输出光谱
Fig. 6 Output spectrum of ten 800 nm semiconductor laser arrays after spectral beam combining

10 个 800 nm 半导体激光线阵光谱合束后的功率、E-O 效率及电压随电流的变化如图 7 所示。由于外腔反馈提高了谐振腔增益,激光器阈值电流由 15 A 降至 7 A。在电流 50 A、电压 17.8 V 驱动下,连续输出功率为 363.5 W,E-O 效率为 40%,斜率效率为 8.45 W/A。

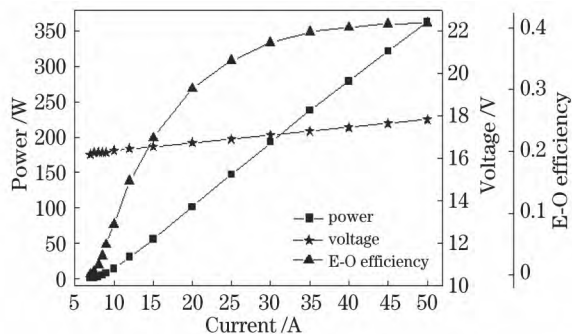


图 7 10 个 800 nm 半导体激光线阵光谱合束后功率、E-O 效率及电压随电流变化
Fig. 7 Power, voltage, and E-O efficiency versus current of ten 800 nm semiconductor laser arrays after spectral beam combining

在单线阵内部的各单元谐振也存在明显差别,图 8 为第 6 个线阵的输出光谱,谱宽为 1.90 nm,与理论设计一致。可以看见,有 19 个明显的光谱峰值,说明每个单元均被有效锁定;但从谐振峰值来

看,中间和两侧高,夹杂着低谐振峰值,这可能是芯片封装翘曲或者装调误差,导致外腔反馈光与某些激光单元未能形成高效谐振。

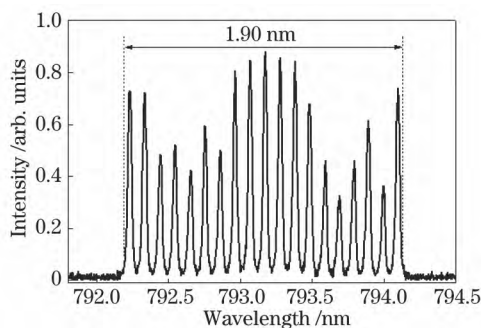


图 8 第 6 个 800 nm 半导体激光线阵光谱合束后的光谱分布
Fig. 8 Spectrum distribution of the sixth 800 nm semiconductor laser array after spectral beam combining

在 50 A 电流驱动下,基于二阶矩评价标准^[14]直接测试合束激光质量,结果如图 9 所示,光参量积为 4.165 mm·mrad。根据亮度公式^[15],可计算出对应亮度为 212 MW/(cm²·sr),与当前该波段报道的 15.5 MW/(cm²·sr)相比,激光亮度提高 1 个数量级,大大提升了 800 nm 波段半导体激光器的性能。

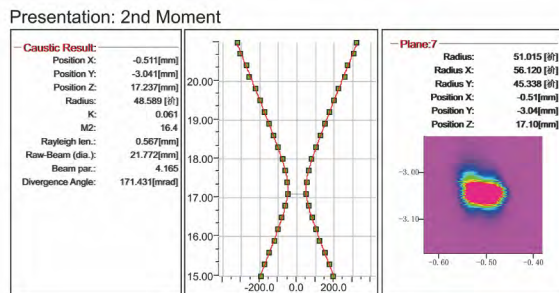


图 9 10 个 800 nm 半导体激光线阵光谱合束后的输出光束质量

Fig. 9 Output beam quality of ten 800 nm semiconductor laser arrays after spectral beam combining

4 结 论

针对激光远距离照明,基于光谱合束技术,通过优化谐振光谱、单元谱宽及光谱合束结构等,研制出 800 nm 波段的高功率、高光束质量、高亮度半导体激光器,实现 10 个 800 nm 激光线阵的高效率耦合,获得连续功率为 363.5 W、光束质量为 4.17 mm·mrad,电光转换效率为 40%,亮度为 212 MW/(cm²·sr)的 800 nm 波段激光,与当前相近波段水平相比,亮度提高了 1 个数量级。

下一步通过扩展激光芯片增益带宽、压缩单元谱宽来增加光谱合束激光单元数量,同时结合偏振

合束,提升合束功率至千瓦级甚至更高,为远距离激光照明等应用提供高性能激光光源。

参 考 文 献

- [1] Hemenway M, Chen Z, Urbanek W, et al. Continued advances in high brightness fiber-coupled laser modules for efficient pumping of fiber and solid-state lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10514: 105140P.
- [2] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Teradiode's high brightness semiconductor lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9730: 97300C.
- [3] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. Optics Letters, 2000, 25(6): 405-407.
- [4] Yu H, Tan S Y, Pan H D, et al. Development of a 350 W, 50 μm , 0.15 NA wavelength stabilized fiber coupled laser diode module for pumping Yb-doped fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11262: 112620V.
- [5] Villarreal F, Zhou W, Roethle J, et al. Advances in blue and near-IR high-power/high-brightness direct diode lasers using wavelength beam combining [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11262: 112620U.
- [6] Strohmaier S G, Erbert G, Meissner-Schenk A H, et al. kW-class diode laser bars [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 100860C.
- [7] Zhang J, Peng H Y, Fu X H, et al. CW 50 W/M² = 10.9 diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3627-3632.
- [8] Zhou Q, Zhou C H, Yu N, et al. Narrow-spectral-span spectral beam combining with a nonparallel double-grating structure[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(9): 091403.
- [9] Sun S J, Tan H, Meng H C, et al. Coupler free grating external cavity spectral beam combining of diode laser stacks [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1001007.
- 孙舒娟, 谭昊, 孟慧成, 等. 半导体激光器叠阵无输出耦合镜光栅外腔光谱合束[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001007.
- [10] Peng H Y, Zhang J, Fu X H, et al. High-efficiency external cavity spectral-beam-combined diode laser array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(7): 0702015.
- 彭航宇, 张俊, 付喜宏, 等. 高效外腔光谱合束半导体激光器阵列[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702015.
- [11] Zhang J, Peng H Y, Liu Y, et al. Hundred-Watt diode laser source by spectral beam combining [J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(12): 125803.
- [12] Yuan Q H, Jing H Q, Zhong L, et al. Thermal stress in high-power semiconductor laser packaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1001009.
- 袁庆贺, 井红旗, 仲莉, 等. 大功率半导体激光器封装热应力研究 [J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1001009.
- [13] Song J, Gao X, Yan H Y, et al. Thermal lens effect of high power semiconductor laser waveguide and its influence on beam divergence angle of slow axis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1005004.
- 宋健, 高欣, 闫宏宇, 等. 大功率半导体激光器波导热透镜效应及对慢轴光束发散角的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1005004.
- [14] ISO copyright office. Lasers and laser-related equipment; test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios; part 2: general astigmatic beams: ISO 11146-2 [S]. Switzerland: BSI British Standards, 2005.
- [15] Bachmann F, Loosen P, Poprawe R. High power diode lasers technology and applications [M]. New York: Springer, 2007: 55-57.