

基于二向色镜密集光谱合束的高亮度半导体激光研究

郭林辉^{1,2}, 张兰平^{1,2}, 傅芸^{1,2}, 蒋全伟^{1,2},
谭昊^{1,2}, 杜维川^{1,2}, 高松信^{1,2*}, 武德勇^{1,2}, 唐淳^{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 相比常规的二向色镜激光合束,采用窄线宽半导体激光结合薄膜二向色镜进行的密集光谱合束,通道数量显著增多,可以实现高功率、高亮度的半导体激光输出。理论分析了薄膜二向色镜入射角度与中心波长、透过率之间的关系,结果表明:随着入射中心波长增大,入射角度逐渐变小,同时薄膜二向色镜的透射谱随之发生改变。对中心波长为 969 nm、976 nm、981 nm 的 3 束半导体激光开展了密集光谱合束实验,实现了输出功率为 311.9 W、合束效率为 95.88%、亮度为 58.42 MW/(cm²·sr)、子束光谱间隔最大为 7 nm 的合束激光输出,合束激光相比子束的光束质量退化率不大于 1.06 倍。

关键词 激光器; 半导体激光; 光谱合束; 二向色镜; 高亮度

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202149.0901001

1 引言

半导体激光器(LD)具有电光转换效率高、体积小、重量轻、寿命长、可靠性好等显著优点^[1],但其自身结构导致的单元功率低、光束质量差及亮度低等缺点^[2-3],严重限制了 LD 作为直接光源在工业和国防领域的广泛应用。

激光合束技术可以将多单元光束耦合成一束,实现高功率激光输出,近年来已成为高功率、高亮度 LD 的研究热点^[4-6]。二向色镜密集光谱合束技术是一种基于高陡直超窄带截止滤光薄膜实现多路不同波长 LD 共孔径的合束技术^[7],具有输出激光光谱的宽度窄(<4 nm)、波长稳定性好、亮度高,以及系统紧凑可靠等优点,是提高 LD 亮度和输出功率以及改善光谱特性的有效途径之一。

2012 年,美国相干公司的 Grasso 等^[8]基于 973.5 nm 和 975 nm LD 子束,通过密集光谱合束获得了大于 500 W 的激光输出,合束效率为 90%。2014 年,德国 Directphotonics 公司的 Fritsche 等^[9]基

于二向色镜密集光谱合束方法对 4 路 LD 合束,获得了 450 W 激光输出,输出光束的光束质量为 4.5 mm·mrad、合束光谱通道为 12 nm,子束间隔为 4 nm。2016 年,基于类似的方式,德国 Fraunhofer ILT 研究所和德国 DILAS 公司获得了连续输出功率为 800 W、光束质量为 8.5 mm·mrad 的 LD 光源,并分别对 1 mm 和 2.5 mm 厚不锈钢板开展了切割研究^[10]。2018 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的朱洪波等^[11]基于二向色镜对 3 路(91x nm、94x nm 及 97x nm)半导体激光开展了常规稀疏光谱合束(子束光谱间隔 30 nm),合束效率可达 97.5%。2019 年,南京理工大学的陈凡等^[12-13]报道了基于二向色镜的光纤激光光谱合束研究,获得了 6.2 kW 合成激光输出,合成效率为 97%。目前,国内在光谱间隔不大于 7 nm 的半导体激光二向色镜密集光谱合束研究方面还未见公开报道。子束光谱间隔越小,在有限光谱带宽内可合束的子束数量越多,越有利于半导体激光实现高功率、高亮度输出,从而有望使半导体激光在激光深熔焊、激光切割及小型机动

收稿日期: 2021-09-03; 修回日期: 2021-09-14; 录用日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11804322)、国家重点研发计划(2018YFB1107302)

通信作者: *13990177052@163.com

平台等对激光亮度和功率密度有较高要求的场合获得广泛应用。其中,子束入射角度与二向色镜用多层薄膜的高透或高反中心波长之间的优化设计是难点。

本研究团队分析了薄膜二向色镜入射角度与中心波长、薄膜透过率之间的关系,结果表明,随着入射中心波长增大,入射角度逐渐变小,薄膜透过率发生改变。基于此,本团队开展了中心波长为 969 nm、976 nm 及 981 nm 的高功率 LD 二向色镜密集光谱合束实验,实现了连续输出功率为 311.9 W 的激光合束,合束效率可达 95.88%,亮度为 58.42 MW/(cm²·sr),光谱总宽度为 12 nm。合束激光相比子束的光束质量退化率不大于 1.06 倍,基本保持了子束的光束质量。本研究结果对提升直接半导体激光光源输出功率及亮度具有重要意义。

2 合束设计

基于二向色镜密集光谱合束的高亮度 LD 合束技术,要求子束具有波长锁定(稳定)及谱宽窄化的特点,同时要求合束薄膜经过精确设计及制备,且在连续工作体制下具有高损伤阈值及良好的热稳定性。

本文采用连续输出功率为百瓦级的波长稳定半导体激光光纤耦合输出光源作为合成子束,子束激光通过体布拉格光栅(VBG)实现中心波长稳定,光谱宽度(FWHM)被限定在 1 nm 范围内^[14-15]。通过

扩束准直器对每个子束的输出激光进行准直,获得 mrad 量级的小发散角输出,以便于激光传输及合束调试。通过二向色镜实现三路激光的共孔径密集光谱合束,获得高功率、高亮度半导体激光输出。合束总体结构如图 1 所示。

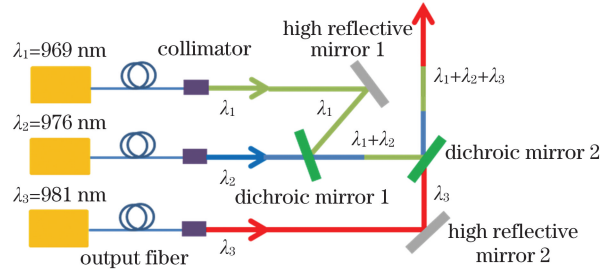


图 1 二向色镜密集光谱合束的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of dense spectral beam combining of dichroic mirror

2.1 二向色镜设计

二向色镜用薄膜的设计遵循法布里-珀罗(F-P)光学腔理论^[16],设计约束为:

$$\lambda_\theta = \lambda_0 \sqrt{1 - (\sin^2 \theta / n_{\text{eff}}^2)}, \quad (1)$$

式中: θ 为空气环境中激光束的入射角度; n_{eff} 为薄膜的有效折射率; λ_0 为正入射时二向色镜滤波中心波长; λ_θ 表示入射角为 θ 时二向色镜滤波中心波长。

薄膜的有效折射率 n_{eff} 由层数和干涉因子决定,设计约束为

$$n_{\text{eff}} = \begin{cases} n_H \sqrt{\frac{m - (m-1)(n_L/n_H)}{(m-1) - (m-1)(n_L/n_H) + (n_H/n_L)}}, & \text{for high-index spacers} \\ n_L \sqrt{\frac{m - (m-1)(n_L/n_H)}{m - m(n_L/n_H) + (n_H/n_L)^2}}, & \text{for low-index spacers} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: n_H 为高折射率层的折射率; n_L 为低折射率层的折射率; m 为干涉级次数。

为获得最大的可调谐入射角度,需要选择最优化的低折射率薄膜涂层材料和高的干涉因子。针对典型参数下薄膜入射中心波长随入射角度的变化进行了数值模拟,模拟参数见表 1。中心波长随入射

表 1 模拟中心波长随入射角度变化的参数

Table 1 Parameters used in simulating the variation of central wavelength with incident angle

Parameter	Value
λ_0 / nm	990
n_H	3
n_L	1.7
θ / (°)	0-30°
m	2, 6

角度的变化如图 2 所示,其中不同薄膜层数对应的曲线在大角度时出现明显变化,干涉级次取 2 和 6 分别对应 4L 光学厚度和 12L 光学厚度(L 代表光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的低折射率膜层)。

基于法布里-珀罗腔结构的二向色镜多层薄膜的特征矩阵为^[17-18]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{k=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_k & \frac{i}{\eta_k} \sin \delta_k \\ i\eta_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{m+1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中,第 k 层膜层的相位厚度为

$$\delta_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k d_k \cos \theta_k, \quad (4)$$

式中: θ_0 为薄膜的入射角; η_k 为第 k 层导纳; η_{m+1} 为

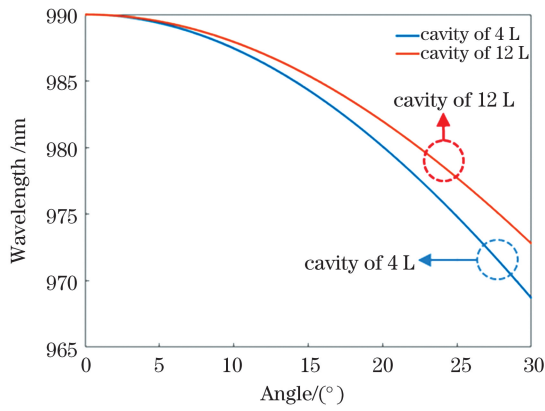


图 2 入射中心波长与入射角度的关系曲线

Fig. 2 Incident central wavelength versus incident angle

第 $m+1$ 层导纳; n_k 为第 k 层折射率; d 为第 k 层物理厚度; θ_k 为第 k 层膜的折射角。 θ_k 可由 Shell 折射定律给出, 即

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = \dots = n_{m+1} \sin \theta_{m+1} \quad (5)$$

第 k 层膜的导纳 η_k 可由 (6) 式给出 (入射空气层和底板的导纳也可以通过该式进行计算), 即

$$\eta_k = \begin{cases} n_k / \cos \theta_k, & \text{p wave} \\ n_k \cdot \cos \theta_k, & \text{s wave} \end{cases} \quad (6)$$

多层薄膜的透过率为

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{m+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (7)$$

式中: η_0 为入射介质的导纳。

可以看出, 在入射光波波长一定的情况下, 薄膜的入射角发生变化会使多层薄膜滤波器的透射谱发生改变。薄膜二向色镜对激光入射角度非常敏感, 为评估二向色镜对不同波长激光的透射或反射效果, 本研究团队采用中心波长分别为 969 nm、976 nm、981 nm 的激光器, 对所研制的二向色镜进行连续激光测试, 测试结果如图 3 所示。结果显示: 在激光器

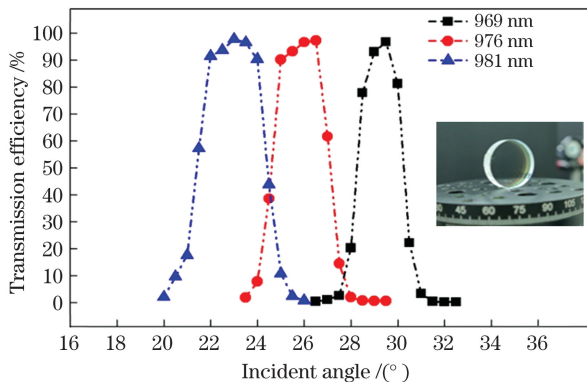


图 3 不同波长激光的入射角度-透射效率关系曲线

Fig. 3 Transmission efficiency versus incident angle for laser with different wavelengths

入射波长逐渐增加的情况下, 为获得高的透射效率, 最佳入射角度需要不断减小, 入射角度的变化率约为 $1.84 \text{ nm}/(^{\circ})$, 入射角度带宽 (包含 90% 的能量) 由 0.9° 增大到 2.2° , 具体数据如表 2 所示。

表 2 不同波长对应的最佳入射角度和入射角度带宽

Table 2 Optimum incident angle and angle bandwidth at different wavelengths

Incident wavelength /nm	Optimum incident angle /($^{\circ}$)	Angle bandwidth (@ $\geq 90\%$ HT) /($^{\circ}$)
969	29.6	0.9
976	26.5	1.6
981	23.0	2.2

Notes: angle measurement error is $\pm 0.1^{\circ}$.

2.2 子束光源设计

半导体激光器芯片出射的激光经光学准直后, 通过作为半导体激光器外腔的体布拉格光栅 (VBG), 可以实现外腔反馈及光谱选择, 起到稳定波长和窄化光谱的作用^[14-15], 原理如图 4 所示。近年来, 光纤激光迅猛发展, 作为光纤激光泵浦源的光纤耦合半导体激光器已发展得相当成熟, 产品化程度非常高^[19]。

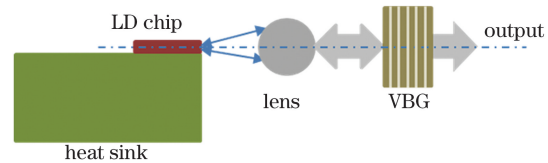


图 4 半导体激光波长稳定的原理图

Fig. 4 Principle diagram of laser diode wavelength stabilization

在实验中, 本研究团队使用 969 nm、976 nm、981 nm 波长的半导体激光器获得了窄光谱间距的 3 个波长稳定半导体激光光纤耦合模块, 其中输出光纤的芯径为 $105 \mu\text{m}$, 光纤的数值孔径为 0.22。在冷却水温为 25°C 的条件下, 本研究团队对光纤耦合输出激光器进行了光学参数测试, 测试结果如图 5 所示。结果显示: 当驱动电流为 11.5 A 时, 3 个半导体激光光纤耦合模块的输出功率均超过了 100 W, 969 nm 激光模块的电光转换效率最高, 为 48.73%。

在满足外腔波长锁定的条件下, 体布拉格光栅的反射率越低, 越有利于获得高的电光转换效率。本实验采用的体布拉格光栅的反射率为 3%, 厚度为 1.5 mm, LD 芯片前腔面的透射率约为 98%。由于采用体布拉格光栅对激光波长进行稳定以及对光谱宽度进行窄化, 因此, 随着驱动电流变化, 子束的中心波长表现出了极好的稳定性。采用多个单管芯 LD 单元将子束通过空间合束耦合进光纤, 光纤输出

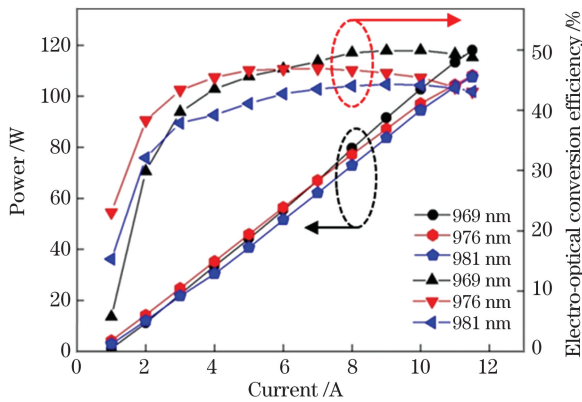


图 5 光纤耦合模块的功率效率曲线

Fig. 5 Measurement curves of power and efficiency of fiber coupling module

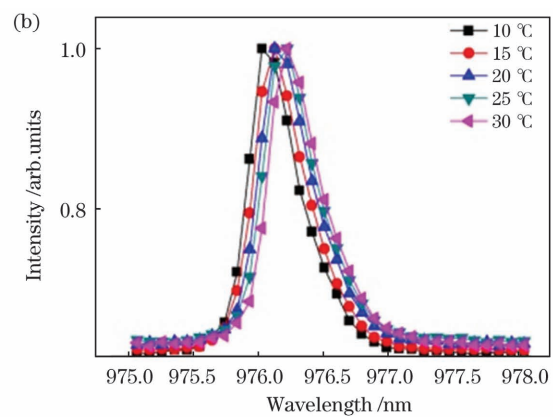
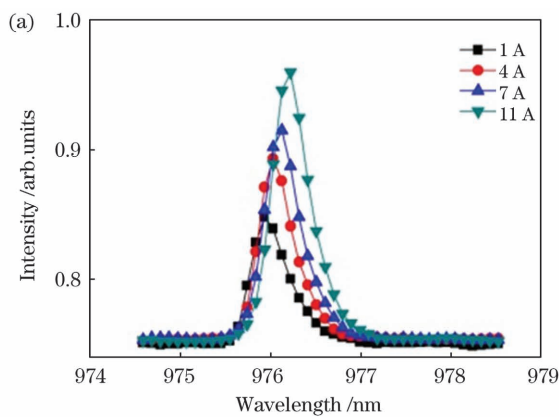


图 6 976 nm 光源激光波长随电流和温度的变化。(a)随电流的变化;(b)随温度的变化

Fig. 6 Variation of 976 nm laser wavelength with current or temperature. (a) Variation with current; (b) variation with temperature

表 3 子束光源的光谱参数(25 °C 水温, 11.5 A 电流)

Table 3 Spectral parameters of sub-beam source (water temperature of 25 °C and current of 11.5 A)

Wavelength of sub-beam /nm	Central wavelength /nm	Spectrum width(FWHM) /nm	Peak transmittance /%
969	969.02	0.52	96.90
976	976.22	0.49	97.10
981	981.11	0.59	97.00

3 实验结果

由于小发散角有利于激光合束光路的调试,因此本课题组采用大恒光电三片式准直透镜 GCX-L12APC-780(焦距约为 12.32 mm),对中心波长分别为 969 nm、976 nm、981 nm 的光纤输出激光光束的发散角进行压缩,以获得低发散角子束光源。准直后的发散角如表 4 所示。基于图 1 所示合束结构搭建并开展了半导体激光的密集光谱合束实验,实验平台实物图如图 7 所示。

表 4 子束激光准直后的发散角

Table 4 Divergence angle after collimation of sub-beam laser

Wavelength of sub-beam /nm	Divergence angle after collimation (<i>x</i> -axis and <i>y</i> -axis)
969	8.15 mrad (<i>x</i> -axis) 8.71 mrad (<i>y</i> -axis)
976	8.50 mrad (<i>x</i> -axis) 8.52 mrad (<i>y</i> -axis)
981	8.38 mrad (<i>x</i> -axis) 7.96 mrad (<i>y</i> -axis)

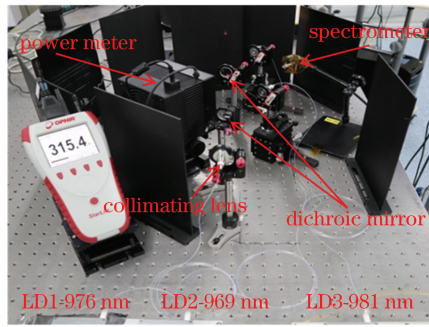


图 7 密集光谱合束实验实物图

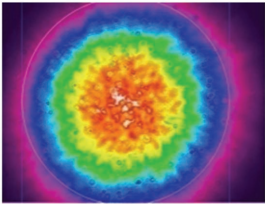
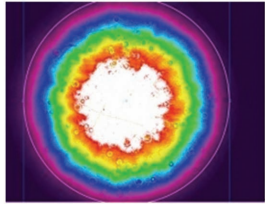
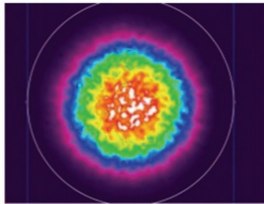
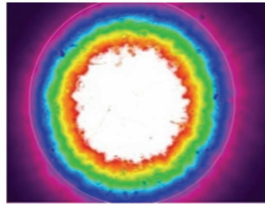
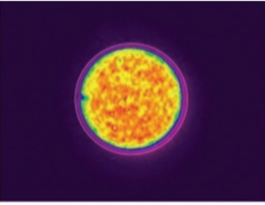
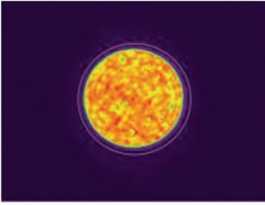
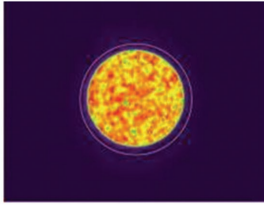
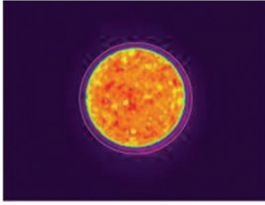
Fig. 7 Physical picture of dense spectrum beam combining experiment

3.1 光学组装及调试

为了获得高质量的共孔径合束效果,本研究团队采用 Spiricon SP620U 型 CCD 探测器,通过同时监测近场光束及远场光束的调试方法^[20]进行实验。实验原理如图 8 所示,其中 CCD1 用于监测近场,CCD2 用于监测远场,远场聚焦透镜的焦距为 $f=300\text{ mm}$ 。对 3 路子束进行精细调节,使近场光斑和远场光斑均实现高精度重合,进而实现共孔径合束。

表 5 合束激光的近场及远场光斑

Table 5 Near field and far field spot of laser

Item	Spot			
	$\lambda=969\text{ nm}$ (No. 1)	$\lambda=976\text{ nm}$ (No. 2)	$\lambda=981\text{ nm}$ (No. 3)	After combining
Near field	 spot size: $5157\ \mu\text{m}$	 spot size: $4388\ \mu\text{m}$	 spot size: $3338\ \mu\text{m}$	 spot size: $5208\ \mu\text{m}$
Far field	 spot size: 2.50 mm	 spot size: 2.54 mm	 spot size: 2.48 mm	 spot size: 2.55 mm

基于光斑质心坐标数据,可以计算出合成光束近场的水平轴向位移误差与垂直轴向位移误差分别优于 $\pm 0.05\text{ mm}$ 和 $\pm 0.03\text{ mm}$,远场的水平轴向指向误差与垂直轴向指向误差分别为 $\pm 0.067\text{ mrad}$ 和 $\pm 0.045\text{ mrad}$,具体如图 9 所示。由以上数据可以看出,合束调试中的位移和指向误差已控制在百微弧度以内,对后续光束质量的影响很小。

子束与合束后的光斑如表 5 所示,可以看到合束光斑在近场和远场均实现了极好的重叠。能量衰减片存在一定的非均匀性,CCD 探测器在衰减条件下会对激光束光斑测试产生一定影响。为了避免这种影响,在实验中采用了固定衰减片,所以 3 路子束合束后实现了能量叠加,使得近场光强度出现饱和现象,而 976 nm 激光子束的近场光强度饱和是由于该子束的原始激光功率比其他两束都稍高。光斑监测的目的是辅助调整光路,远场光斑重合决定子束的指向,近场光斑重合决定子束的重叠位置,因此近场光斑出现的部分饱和不影响整体位置。

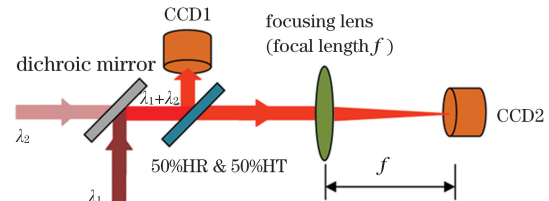


图 8 共孔径合束监测光路原理图

Fig. 8 Schematic of common aperture beam combining monitoring optical path

3.2 合束功率及效率

在冷却水温为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,利用连续驱动电源同时驱动 969 nm 激光子束和 976 nm 激光子束,在 11.5 A 时获得 213.6 W 合束输出功率,合束效率为 98.07% ;之后增加 981 nm 激光子束,进一步实现三路光源合束,在 11.5 A 时获得 311.9 W 合束输出功率,合束效率为 95.88% 。具体实验数据如图 10(a)

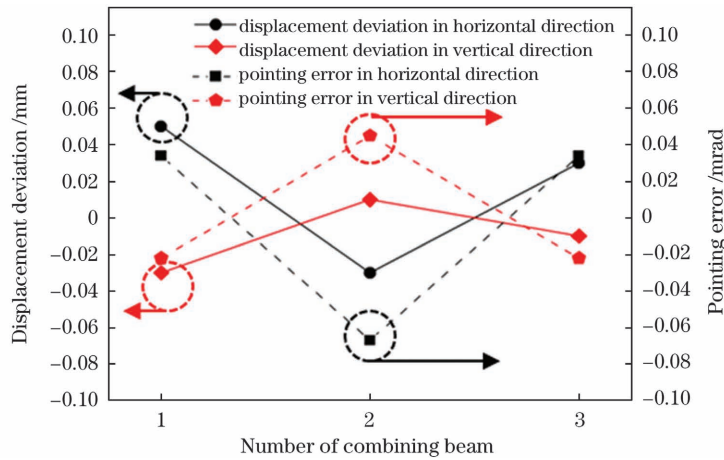


图 9 近场光斑的轴向位移误差与远场光斑的指向误差

Fig. 9 Axial displacement error of near field and pointing error of far field

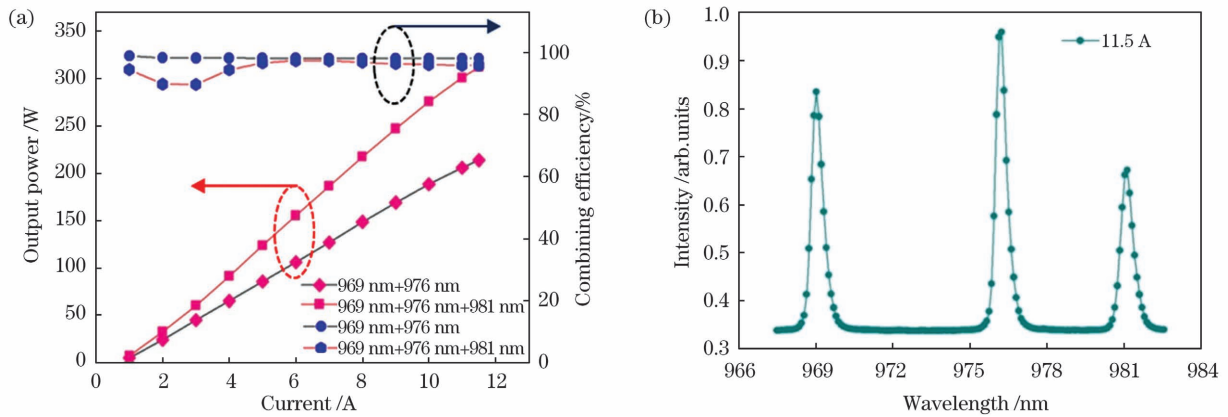


图 10 合束的输出功率、合束效率及光谱曲线图。(a)输出功率和合束效率;(b)光谱曲线

Fig. 10 Output power, combining efficiency and spectral curve of combined beam. (a) Output power and combining efficiency; (b) spectral curve

所示,所用功率计的校准系数为 0.98。此外,利用 HR4000 光纤光谱仪对合束后的激光光谱进行了监测,光谱仪测量精度为 0.1 nm,光谱测试结果如图 10(b)所示。

对于二向色镜的密集光谱合束来说,随着合束次数增多,合束效率会不断减小。第一步合束中的透射率损失约为 3.1%,第二步合束中的透射率损失约为 5%,因此合束效率损失主要来源于透射子束。后续需要结合图 3 中的不同激光波长来优化选择入射角度,以获得最小的功率损失。

3.3 光束质量和亮度

光束质量是评价激光合束效果的一项重要参数,直接影响合束光源的应用效果。采用 Spiricon Beam Squared 光束质量测试仪对 3 路子束及合成光束的光束质量(q)进行测试,测得的具体数据见

表 6。可见,各子束的光束质量有一定差异。这主要是因为 LD 与光纤耦合中的入射角不同导致光纤输出后的发散角有所不同,进而导致不同轴向及不同子束的光束质量都不同。合束后激光光束质量 q_x 和 q_y 分别为 7.22 mm·mrad 和 7.50 mm·mrad。测得的三维光斑效果如图 11 所示。从表 6 中可看到合束激光的光束质量相对于子束退化率不超过 1.06 倍,基本保持了子束的光束质量。

表 6 光束质量测试结果

Table 6 Measurement of beam quality

Beam	$q_x / (\text{mm} \cdot \text{mrad})$	$q_y / (\text{mm} \cdot \text{mrad})$
969 nm laser	6.81	7.11
976 nm laser	5.89	5.99
981 nm laser	5.97	6.02
Combined beam	7.22	7.50

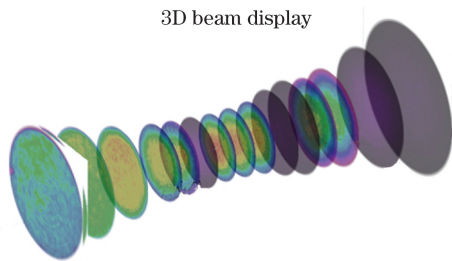


图 11 合成光源光束质量的三维显示图

Fig. 11 Three-dimensional display of beam quality of combined beam source

亮度与激光功率、光束质量均相关,是 LD 合束光源综合性能的重要体现。半导体激光亮度的计算公式为

$$B = \frac{P}{\pi^2 q^2}, \quad (8)$$

式中: B 为激光亮度,单位为 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$; P 为输出激光功率,单位为 W ; q 为输出激光的束参积,

单位为 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

根据 3.2 节中合束激光输出功率和表 6 中合束激光的束参积,计算获得合束光源的亮度为 $58.42 \text{ MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

3.4 二向色镜的温度特性

二向色镜在连续激光加载下的热稳定性会直接影响合束效率、合束光束质量等,主要原因是激光经过合束器件时会有部分能量被吸收,导致器件的折射率发生变化,同时也会增加激光散射。因此,本研究团队采用红外观察仪对合束器件 1 和合束器件 2 的温度进行了监测,监测结果分别如图 12(a)与图 12(b)所示。随着驱动电流从 5 A 增大到 11.5 A,合束器件的温度逐渐升高,合束器件 2 的温升约为 $28.3 \text{ }^\circ\text{C}$,最高温度为 $61.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。对于石英基底光学材料来说,其热稳定性可以满足应用需求。

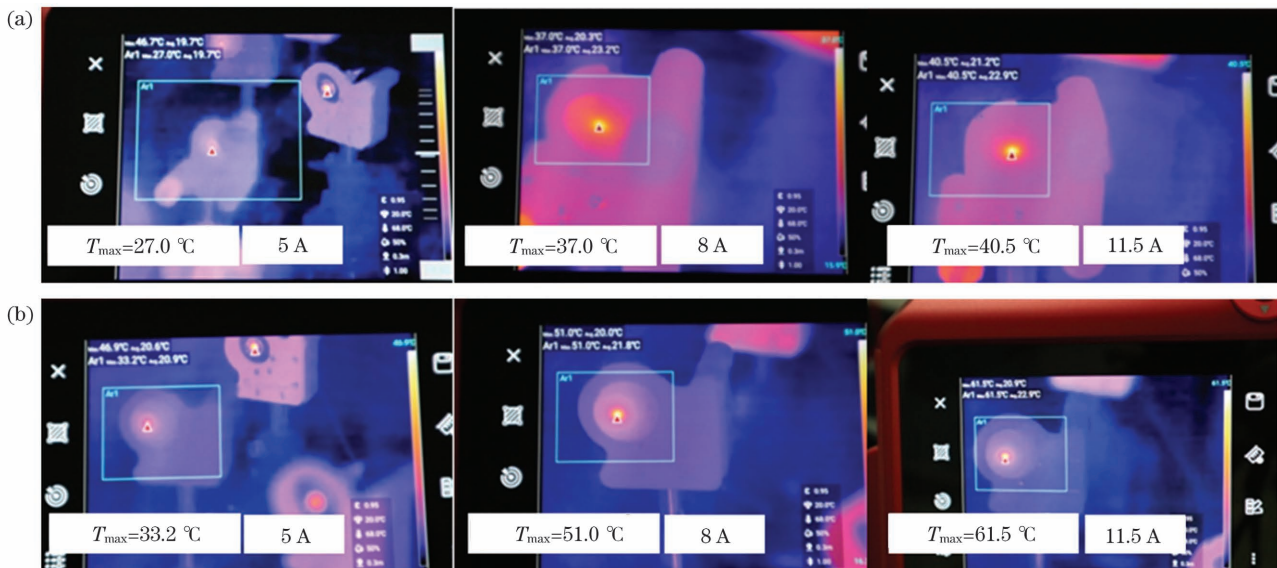


图 12 不同驱动电流下二向色镜的温度监测图。(a)合束器件 1;(b)合束器件 2

Fig. 12 Temperature monitoring charts of dichroic mirror under different driving current values. (a) Beam combiner 1; (b) beam combiner 2

4 结 论

本文采用基于二向色镜的密集光谱合束技术,模拟了窄带滤光薄膜入射角度与中心波长、薄膜透过率之间的关系。利用窄线宽光纤耦合输出半导体激光光源,对中心波长为 969 nm、976 nm、981 nm 的高功率 LD 开展了密集光谱合束实验,实现了输出功率为 311.9 W、合束效率达 95.88%、亮度为 $58.42 \text{ MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 、光谱宽度为 12 nm 的合束激光输出。合束激光相比子束的光束质量退化率不大于 1.06 倍。相比常规的二向色镜激光合束,该方法

中子束光谱间隔从数十纳米减小到了 7 nm 以内,通道数显著增多,可以实现更高功率、更高亮度的半导体激光输出。

下一步拟通过优化半导体激光体布拉格光栅锁定效果,进一步压缩子束谱宽,同时结合薄膜合束器件的角度选择特性,增加子束数量,提升合束功率至千瓦量级,推动 LD 作为直接光源在工业和国防领域的应用。

参 考 文 献

- [1] 张俊,单肖楠,刘云,等.千瓦级高光束质量半导体

- 激光线阵合束光源[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 020201.
- Zhang J, Shan X N, Liu Y, et al. Kilowatt-output and high beam quality diode laser linear array coupling source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 020201.
- [2] 陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.
- Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
- [3] 张俊, 彭航宇, 付喜宏, 等. 基于光谱合束的 800 nm 高亮度半导体激光光源[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701021.
- Zhang J, Peng H Y, Fu X H, et al. High-brightness 800-nm semiconductor laser source based on spectral beam combining [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701021.
- [4] 余俊宏, 郭林辉, 孟慧成, 等. 基于反射式 Bragg 体光栅的密集光谱合束数值模拟研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1115001.
- Yu J H, Guo L H, Meng H C, et al. Numerical simulation study on dense spectral combing based on reflection volume Bragg grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1115001.
- [5] 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.
- 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.
- [6] 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.
- [7] Lequime M. Tunable thin-film filters: review and perspectives[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5250: 302-311.
- [8] Grasso D M, Shou N, Chen H, et al. Wavelength-stabilized fiber-coupled diode laser with 500-W output and 20-mm \cdot mrad beam quality [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8241: 82410K.
- [9] Fritsche H, Kruschke B, Koch R, et al. High brightness direct diode laser with kW output power [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8965: 89650G.
- [10] Witte U, Schneider F, Traub M, et al. kW-class direct diode laser for sheet metal cutting based on DWDM of pump modules by use of ultra-steep dielectric filters[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22917-22929.
- [11] Zhu H B, Lin X C, Zhang Y W, et al. kW-class fiber-coupled diode laser source based on dense spectral multiplexing of an ultra-narrow channel spacing[J]. Optics Express, 2018, 26(19): 24723-24733.
- [12] Chen F, Ma J, Zhu R H, et al. 6.2 kW spectral beam combination by means of edge filters [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11333: 1133306.
- [13] 王敏, 王青, 朱日宏, 等. 光谱合束二向色镜反射率及合束效率仿真研究[J]. 激光技术, 2019, 43(3): 421-426.
- Wang M, Wang Q, Zhu R H, et al. Simulation of reflectivity and combining efficiency of dichroic mirrors for spectral beam combining [J]. Laser Technology, 2019, 43(3): 421-426.
- [14] Kanskar M, Bao L, Chen Z, et al. Continued improvement in reduced-mode (REM) diodes enable 272 W from 105 μm 0.15 NA beam[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10086: 1008609.
- [15] 皮浩洋, 辛国锋, 程灿, 等. 高功率半导体激光器阵列的波长锁定技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 822-825.
- Pi H Y, Xin G F, Cheng C, et al. Wavelength locked high power semiconductor laser linear array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 822-825.
- [16] Moshegov N, Berezin I, Komissarov A, et al. Highly efficient high-power pumps for QCW fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10900: 109000G.
- [17] 王德兵. 基于法布里-珀罗腔结构的光学可调谐滤波器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 14-16.
- Wang D B. Optical tunable filter based on Fabry-Perot cavity [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 14-16.
- [18] 曹昌胜. 基于薄膜干涉滤光片的线性调谐光滤波器研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005: 8-11.
- Cao C S. Study on linear tuning filters based on interference thin-film filters [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005: 8-11.
- [19] Kelemen M, Gilly J, Friedmann P, et al. Diode lasers optimized in brightness for fiber laser pumping [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10514: 105140F.
- [20] 郭林辉, 吕文强, 高松信, 等. 垂直阵列 DL 巴间准直光束指向精度测量方法[J]. 光电工程, 2011, 38(1): 11-14.
- Guo L H, Lü W Q, Gao S X, et al. Measurement of the collimated beam pointing among bars for diode laser vertical stack[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(1): 11-14.

Dichroic Mirror Based on Dense Wavelength Combining of High-Brightness Laser Diode

Guo Linhui^{1,2}, Zhang Lanping^{1,2}, Fu Yun^{1,2}, Jiang Quanwei^{1,2}, Tan Hao^{1,2},
Du Weichuan^{1,2}, Gao Songxin^{1,2*}, Wu Deyong^{1,2}, Tang Chun^{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 (CAEP), Mianyang 621900, Sichuan, China*

Abstract

Objective The laser diode (LD) has many advantages, such as light weight, high efficiency and high reliability. However, it has disadvantages, such as low power in a single unit, poor beam quality and low brightness, that limit the LD's application as a direct laser source in industry and national defence. Dichroic mirror spectral beam combination is a common aperture and different wavelength LD beam combing technology based on the super steep, narrow-band and thin-film. This method has advantages of narrow spectral width, stable wavelength, high brightness and compact system, which has been an effective approach for improving LD brightness, output power and spectral characteristics. We started with the Fabry-Perot (F-P) cavity basic theory and analysed the relationship between incident angle and central wavelength or transmission. It provided the basis for beam combing with thin-film and high efficiency dense spectral beam combing. Simultaneously, we were the first in China to conduct a three sub-beam combing experiment based on thin-film with a spectral interval of less than 7 nm. A 311.9 W power was obtained, with a 95.88% beam combing efficiency, a 58.42 MW/(cm²·sr) brightness, and a spectral width of 12 nm. We hope that the findings of our study will spur the use of laser deep fusion in welding, cutting, and small mobile platforms.

Methods In this letter, we began with the basic theory of an F-P optical cavity, analysed the relationship between thin-film incident angle and central wavelength, as well as transmission. Then, we used different wavelengths of LD to evaluate the thin-film device angle and transmission properties. In addition, the spectrum, power, and efficiency of the sub-beam source were measured in variable current and temperature. Next, we established the dense spectral beam combing platform and conducted experimental research, such as pointing error analysis of near-and far-fields after installation and adjustment. In contrast, we measured the beam combing power and efficiency, as well as the beam quality deterioration before and after combing. Furthermore, we monitored the thin-film device's heat stability to demonstrate the beam combing system's stability. The optical path was established through the method of theoretical analysis and experimental demonstration. We can achieve kW level power output in the condition of 10 channel beam combing, according to the design and experiment. In addition, we compared the design to the measurement, and the two agreed well.

Results and Discussions The study showed that as the central wavelength increased, the incident angle was smaller (Fig. 2), and the transmission spectrum shifted. To achieve beam combing, we used different wavelengths, such as 969, 976, and 981 nm, and the transmission was evaluated using the wavelength vs angle curve (Fig. 3, Table 2). For example, the best incident angle of 969 nm sub-beam is 29.6°, and the angle bandwidth is 0.9°. The spectrum was measured at currents ranging from 1 to 11 A and temperatures ranging from 10° to 30° (Fig. 6, Table 3). We studied three sub-beam beams combing with a spectral interval of less than 7 nm and obtained an output power of 311.9 W, a beam combining of 95.88% (Fig. 10), a brightness of 58.42 MW/(cm²·sr), a spectral width of 12 nm, and a beam quality deterioration was less than 1.06 times (Table. 6). The temperature of the thin-film filter (TFF) device ranged from 27 °C to 61.5 °C with currents ranging from 5 A to 11.5 A (Fig. 12). The results show that using TFF beam combing, we can obtain stable and high power output, the efficiency and beam quality deterioration are acceptable, the TFF device can bear high power density, and it has a strong promotion to the high power LD.

Conclusions We used dichroic mirror dense spectral beam combing to model and analyse the impact on incident angle, centre wavelength and thin-film transmission. Further, we developed an experimental study on three sub-

beam combing wavelengths of 969, 976, 981 nm, achieving an output power of 311.9 W, a beam combining of 95.88%, a brightness of 58.42 MW/(cm²·sr), a spectral width of 12 nm, and a beam quality deterioration of less than 1.06 times. Compared to traditional beam combing based on the dichroic mirror, we can decrease the spectral width from several tens of nm to only 7 nm, and the combing channels substantially increased, allowing us to achieve higher brightness and power LD output relatively easily. In addition, when compared with dense spectral beam combing of about 0.5 nm, this type of beam combing has the disadvantages of a wider spectral interval, but this method can play the role of secondary beam combing and the output from dense spectral beam combing can be regarded as sub-beam. These findings are important in terms of increasing the power and brightness of direct diode lasers.

Key words lasers; diode laser; spectral beam combining; dichroic mirror; high brightness