

半导体激光器叠阵无输出耦合镜光栅外腔光谱合束

孙舒娟^{1,2,3}, 谭昊^{1,2*}, 孟慧成^{1,2}, 郭林辉^{1,2}, 高松信^{1,2}, 武德勇^{1,2}, 许放^{1,3}

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;

³中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 宽面发射半导体激光器的光谱合束技术对发展高功率直接半导体激光光源具有重要意义。光栅外腔光谱合束基于光栅的波长选择特性和外腔半导体激光技术, 实现单个合束单元的光谱锁定和所有合束单元的合束输出, 输出光束质量与单个合束单元相当, 亮度和功率得到很大提高。基于两个半导体激光器短阵列叠阵, 进行了无输出耦合镜光栅外腔光谱合束实验研究, 实现了 12 个半导体激光器短阵列的光谱合束。分析了光谱合束的输出光谱、输出功率和光束质量, 在 70 A 的抽运电流下, 连续输出功率为 578 W, 光谱带宽为 10.26 nm, 电光转换效率 46.5%。

关键词 激光器; 半导体激光器; 输出耦合镜; 光栅外腔; 光谱合束

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1001007

Coupler Free Grating External Cavity Spectral Beam Combining of Diode Laser Stacks

Sun Shujuan^{1,2,3}, Tan Hao^{1,2*}, Meng Huicheng^{1,2}, Guo Linhui^{1,2},

Gao Songxin^{1,2}, Wu Deyong^{1,2}, Xu Fang^{1,3}

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

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

³Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Spectral beam combining of a broad area diode laser is a promising technique for high power direct diode laser applications. Grating external cavity spectral beam combination is based on wavelength selection characteristics of the grating and external cavity diode laser technology to achieve the locking of the single emitter spectrum and the combination of all the sub-beam combining elements into one output. The beam quality of the output is equivalent to that of a single beam combining element, and the brightness and power are greatly improved. An experimental study on the coupler free grating external cavity spectral beam combining of two mini-bar stacks was presented. Spectral beam combination of 12 diode laser short array stripes was realized. The characteristics of spectrum, power, and beam quality of the output beam were analyzed. At the pump current of 70 A, the continuous output power of 578 W, spectral bandwidth of 10.26 nm, and electro-optical conversion efficiency of 46.5% were achieved.

Key words lasers; diode laser; coupler; grating external cavity; spectral beam combining

OCIS codes 140.2020; 140.3298; 140.3410; 050.1950

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-05-10; 录用日期: 2018-05-24

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(2013YQ120355)、中国工程物理研究院高能激光科学与重点实验室基金(HEL2018-03)

* E-mail: tanhaomf@163.com

1 引 言

半导体激光器具有效率高、结构紧凑、波长范围宽、成本低、可靠性高等优良特性。然而传统的半导体激光器光谱特性差,光束质量差,直接输出功率和亮度低。为了扩展半导体激光器在工业加工(如表面处理、焊接、增材制造、切割)和激光器抽运(如减小光纤激光器的非线性效应,简化固体激光器谐振腔设计,碱金属激光器抽运)等方面的应用,获得高功率、高亮度、高光束质量的直接半导体激光光源,已成为亟待解决的技术问题,美国、德国等已将其列入国家重大计划^[1-2],而激光合束技术被证明是解决该难题的有效方法之一。

对半导体激光器输出光束进行合束的方法有空间合束、偏振合束和光谱合束(SBC)。空间合束在提高功率的同时会在一定程度上降低光束质量和亮度;偏振合束是利用偏振合束器件将偏振方向互相垂直的两束光合成一束,可在不改变光束质量的情况下使功率和亮度翻倍;光谱合束将两个或两个以上不同波长的半导体激光器的出射光合成一束,得到与单元光束质量相当、亮度提高数倍的激光输出。自2000年美国麻省理工学院提出半导体激光器光栅外腔光谱合束的概念以来^[3],国内外许多研究机构对其展开了深入的研究,光谱合束被证明是提高半导体激光器光束质量、实现高亮度输出最有效的合束技术之一。美国 TeraDiode 公司在2012年利用输出耦合镜光谱合束技术,研制了500 W的SBC单元模块,并基于此模块结合偏振合束、波长合束等技术推出了2 kW直接半导体激光光源^[4],继而展示了4,6,8 kW高亮度尾纤输出光源产品,其4 kW光纤(100 $\mu\text{m}/\sim 0.08$ 数值孔径)耦合输出产品可获得2500 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 的亮度,电光效率为44%^[5]。美国 TRUMPF Laser GmbH 公司在2015年采用超窄带薄膜滤波片外腔进行波长锁定、透射式衍射光栅进行合束的结构实现半导体激光器的光谱合束,获得功率550 W、光谱带宽37 nm的激光输出^[6]。北京工业大学^[7]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[8]、中国科学院上海光学精密机械研究所^[9]、四川大学^[10]、中国工程物理研究院应用电子学研究所^[11-13]也展开了相关的研究。其中四川大学重点对光谱合束相关理论模型进行了数值模拟和详细分析^[14],中国工程物理研究院应用电子学研究所于2017年采用输出耦合镜光栅外腔结构进行三个叠阵的光谱合束,获得了70 A电流下

579 W的连续输出,快慢轴 M^2 因子分别为14.7和18.4,亮度为232 $\text{MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$,输出光谱宽度为18.8 nm^[15]。

在已有的研究中,实现光谱合束的方法多是基于输出耦合镜光栅外腔结构,关于无输出耦合镜光栅外腔结构的研究较少。在输出耦合镜光栅外腔结构中采用光栅衍射的1级光束进行发光单元的波长锁定,而光栅的0级光通常需要进行光束转储,无输出耦合镜结构避免了该问题。另外将光谱合束技术应用于一个或多个叠阵合束的研究也较少,而很多直接半导体激光光源应用对激光输出性质有较高的要求,例如在钣金切割和深熔焊接时需要高输出功率和高亮度的激光系统,在高质量材料切割中需要高光束质量以保证精确的加工方向^[16]。因此光谱合束技术在保证合束后光束质量等于单个发光单元光束质量的同时,还需要在一个外腔中让更多合束单元参与到合束中以获得更高的功率。

研究采用无输出耦合镜光栅外腔结构,利用光栅0级光进行发光单元的波长锁定,实现了半导体激光器的光谱合束,并且将常规空间合束技术与光谱合束技术相结合,使用两个短阵列条叠阵实现了70 A抽运电流下578 W的连续输出功率,光谱带宽为10.26 nm,电光转换效率46.5%。光谱合束后输出光束快轴和慢轴的 M^2 值分别为23.6和19.3。该研究提供了一种无输出耦合镜条件下实现光谱合束的方法,并通过多种合束技术相结合的组合式合束结构提高了直接半导体激光器的输出功率。

2 理论分析及实验装置

2.1 理论分析

2.1.1 两种光谱合束结构

图1所示为输出耦合镜光栅外腔光谱合束原理。该结构将光栅等衍射元件与部分反射外腔镜结合,实现半导体激光器的外腔锁模和合束单元的合束输出。结构中变换柱透镜将光源发射的光束重叠到光栅上,从而产生三组衍射光束,两个0级和一个1级光束,其中1级光束是输出光束且亮度最大。部分反射输出耦合镜将一部分1级光束反射回发光单元用于锁定波长,两个0级光束通常需要进行光束转储。望远镜系统或可选狭缝的使用有助于抑制串扰。

图2所示为无输出耦合镜光栅外腔光谱合束结构,该结构中不使用1级衍射光束进行波长稳定,而是使用由反射镜A反射的0级光束作为反馈光。

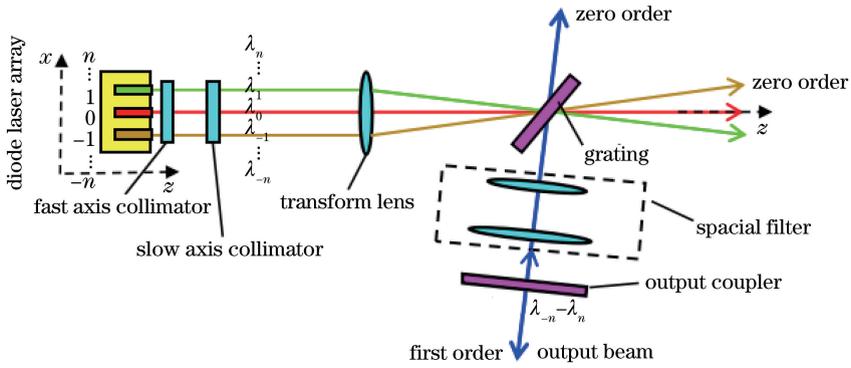


图 1 输出耦合镜光栅外腔结构光谱合束原理示意图

Fig. 1 Schematic of output coupler based grating external cavity SBC

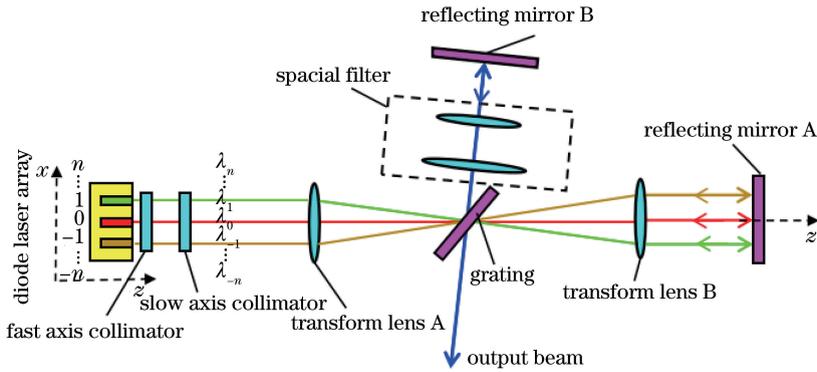


图 2 无输出耦合镜光栅外腔结构的光谱合束原理示意图

Fig. 2 Schematic of coupler free grating external cavity SBC

使用 0 级光束进行发光点波长锁定的一个优点是大部分光可循环利用,克服了 1 级反馈锁定腔存在的多种问题,例如大量的 0 级光功率被浪费,用于抑制串扰的柱面望远镜系统放置在合束输出光路中导致输出光束被拦截而产生大量功率损耗等。

与图 1 所示输出耦合镜光栅外腔结构相比,无输出耦合镜光栅外腔结构中包括快轴准直镜(FAC)、慢轴准直镜(SAC)、变换柱透镜 A、衍射光栅、变换柱透镜 B、0°反射镜 A、柱面望远镜系统和 0°反射镜 B。半导体激光光源在变换透镜 A 的焦平面上,反射镜 A 在变换透镜 B 的焦平面上,两变换透镜形成远焦望远镜系统,光栅到两个透镜的距离为透镜焦距。从半导体激光阵列条发出的各单元光束通过变换透镜 A 叠加到衍射光栅上,1 级衍射光作为输出光束,0 级光束(图示为透射通过光栅)被变换透镜 B 截取,在反射镜 A 处成光源的实像。光源实像被反射镜 A 反射沿原光路反向传播,此时变换透镜 B 充当反馈光(光源的实像)并且将光束重叠到衍射光栅上。反馈光的一部分被投射到半导体激光器腔内用于稳定激光器波长,而另一部分被衍射,沿 1 级衍射输出光束相反的方向到达 0°反射镜

B,经过反射镜 B 反射后其中多数再次进过光栅衍射被重新投射到反射镜 A,另一部分透过光栅作为输出。因此输出光束由两部分组成:从反射镜 B 出发经过光栅的透射光和从光源出发经过光栅的 1 级衍射光。反馈光束由两部分组成:从反射镜 A 出发经过光栅的透射光束和由反射镜 B 出发经光栅衍射到达反射镜 A 再次被反射到光栅的透射光束。

2.1.2 光谱合束原理分析

在光栅外腔光谱合束系统中,单元光束从包含多个发光点的激光光源发出,以不同波长、不同入射角入射到合束元件光栅上,经过光栅衍射后定向叠加,以相同的传播方向合束输出从而获得多谱峰输出光束。在合束元件处,每个输入光束的入射角度与波长一一对应,这种对应产生一组特定的波长-角度对系统。根据光栅方程,波长和入射角满足

$$\lambda_n = d(\sin \alpha_n + \sin \alpha_{\text{Littrow}}), \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \quad (1)$$

式中: λ_n 为第 n 个合束单元中心波长; d 为光栅周期; α_n 为第 n 个合束单元到光栅的入射角; α_{Littrow} 为光栅 Littrow 角。

单元光束从半导体激光阵列条发出,经过变换

柱透镜,发光点的空间位置信息被映射为入射角度信息。设 p 为阵列条上发光点间的间距, f_{TL} 为变换柱透镜的有效焦距,则根据透镜变换的几何关系,第 n 个单元光束入射角为

$$\alpha_n = \alpha_{Littrow} + \arctan \frac{np}{f_{TL}}. \quad (2)$$

联立(1)式和(2)式可得

$$\lambda_n = d \left[\sin \alpha_{Littrow} + \sin \left(\alpha_{Littrow} + \arctan \frac{np}{f_{TL}} \right) \right]. \quad (3)$$

实验中一般满足 $f_{TL} \gg np$, 因此可取近似 $\arctan(np/f_{TL}) \approx np/f_{TL}$, 则(3)式化简为

$$\lambda_n = d \left[\sin \alpha_{Littrow} + \sin \left(\alpha_{Littrow} + \frac{np}{f_{TL}} \right) \right], \quad (4)$$

分别对 λ_n 和 n 求一阶导数,得到光谱合束中相邻发光点中心波长的波长间隔 $\Delta\lambda(n)$ 为

$$\Delta\lambda(n) = \frac{dp}{f_{TL}} \cos \left(\alpha_{Littrow} + \frac{np}{f_{TL}} \right). \quad (5)$$

由(5)式可以看出,在选定光栅之后,相邻合束单元波长间隔由变换柱透镜的有效焦距 f_{TL} 和光源发光点间间隔 p 共同决定,且随着发光点位置不同,相邻发光单元间的波长间隔不同。当所选光栅的 Littrow 角较小,即 $\alpha_{Littrow}$ 与 np/f_{TL} 可比拟时,波长间隔 $\Delta\lambda(n)$ 随发光点位置变化明显,在输出光谱

中波峰分布呈不均匀状态,在光谱上表现为随着 n 的增大光谱间隔从中心波长向两侧逐渐减小。一般所选光栅的 Littrow 角较大,实验系统中不仅满足 $f_{TL} \gg np$, 且同时满足 $\alpha_{Littrow} \gg np/f_{TL}$, 此时(5)式化为

$$\Delta\lambda = \frac{dp}{f_{TL}} \cos \alpha_{Littrow}. \quad (6)$$

(6)式表明在一般情况下,合束输出光束的波长间隔近似相等,且实验所用的变换柱透镜有效焦距越长,波长间隔越小。由(6)式可得各个发光点的中心波长为

$$\lambda_n = \lambda_0 + n\Delta\lambda = \lambda_0 + n \frac{dp}{f_{TL}} \cos \alpha_{Littrow}, \quad (7)$$

式中: λ_0 为以 Littrow 角入射的中间发光点的中心波长。可以得出在光谱合束方向上有 N 个发光点的光谱合束输出谱宽 $\Delta\Lambda$ 为

$$\Delta\Lambda = (N - 1) \frac{dp}{f_{TL}} \cos \alpha_{Littrow}. \quad (8)$$

2.2 实验装置

叠阵光谱合束的实验结构如图3所示。为了对快慢轴方向的光束质量进行匀化,叠阵由6个短阵列在快轴方向堆栈而成。为了进一步提高合束输出功率,采用两叠阵空间合束与光谱合束相结合的方式,图中 P 为两叠阵间的等效间隔。

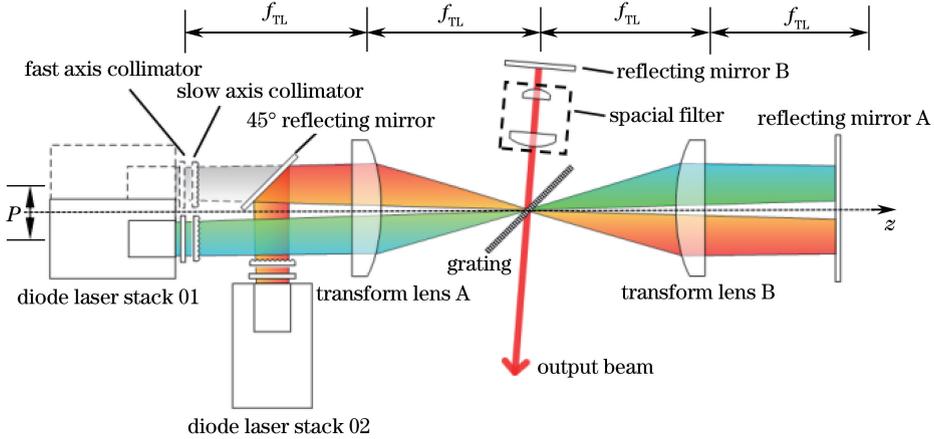


图3 基于无输出耦合镜光栅外腔的两叠阵光谱合束结构示意图

Fig. 3 Schematic of the SBC system with two-diode laser stacks based on coupler free grating external cavity

用于实验的半导体激光短阵列条参数如表1所示。实验采用微通道(MCC)冷却方式,冷却水温度为 20°C , 半导体激光阵列工作在连续波模式下。

为了减小本征腔对输出功率和光束质量的影响,芯片采用前腔增透处理,前腔面的反射率 R 小于 0.1% 。使用有效焦距 $f_{FAC} = 1\text{ mm}$ 的快轴准直镜对阵列条出射光束进行快轴方向准直,使用有效

焦距 $f_{SAC} = 3\text{ mm}$ 的慢轴准直镜对阵列条出射光束进行慢轴方向准直。采用焦距 $f_{TL} = 330\text{ mm}$ 的变换柱透镜,为了减小耦合腔效应的影响,变换柱透镜亦采用增透处理。两个焦距分别为 $f_1 = 255\text{ mm}$ 和 $f_2 = 25\text{ mm}$ 的柱透镜组成的望远镜系统放置在光学反馈路径中,其主要作用是充当空间频率滤波器。该系统横向压缩光束,表现出较大衍射角的串扰光

束被进一步偏转而不能垂直入射到 0° 反射镜 B, 无法从外腔反馈回到内腔, 从而抑制相邻发光点之间的串扰。

表 1 半导体激光短阵列条基本结构参数
Table 1 Specific parameters of the 976 nm diode laser mini-bar

Parameter	Numerical value
Chip width	4.5 mm
Cavity length	3 mm
Number of emitter	9
Front facet reflectivity	$<0.1\%$
Emitter width	100 μm
Emitter pitch	500 μm
Slow axis divergence	10° (at 90% power contained)
Fast axis divergence	50° (at 90% power contained)
Central wavelength	(976 ± 3) nm (at 70 A)

选用高效率透射式衍射光栅, 光栅刻线 1600 line/mm, Littrow 角 $\alpha_{\text{Littrow}} = 51.33^\circ$ ($\lambda_0 = 976$ nm), 在波长 966 ~ 989 nm 范围内衍射效率约为 94%。光栅放置在合束单元中心光线以 Littrow 角入射的角度下。

基于以上结构参数, 由(6)式可求得相邻谱峰间隔 $\Delta\lambda = 0.59$ nm, 由(8)式可求得单个叠阵的光谱展宽 $\Delta\lambda$ 为 4.7 nm, 两叠阵空间合束输出光束光谱宽度 $\Delta\lambda'$ 为 10.03 nm, 其计算公式为

$$\Delta\lambda' = (N - 1) \frac{dP}{f_{\text{TL}}} \cos \alpha_{\text{Littrow}} + \frac{dP}{f_{\text{TL}}} \cos \alpha_{\text{Littrow}}, \quad (9)$$

式中: P 为图 3 所示两叠阵间的等效间隔, 该结构中 $P = 4.5$ mm, 式中第二项表示两叠阵中心波长间隔。

3 实验结果及讨论分析

图 4 为 70 A 工作电流下使用 FAC 和 SAC 准直后两个半导体激光叠阵自由运转时的输出光谱, 光谱带宽为 19.3 nm 且光谱分布较为分散, 分析原因如下: 1) 耦合腔效应, 由于叠阵阵列条前腔面增透, $R < 0.1\%$, FAC 和 SAC 的残余反射进入半导体激光谐振腔形成耦合腔, 导致光谱展宽并对最终的光束质量和光谱有一定的影响; 2) 每个半导体激光阵列条的每一个发光点自由运转中心波长不完全一致。

图 5 为工作电流 70 A 时 SBC 的输出光谱, 可以看出图中两簇谱峰分别来自 01 和 02 号叠阵, 每簇光谱 9 个锁定的主谱峰有相同的强度, 主峰之间没有寄生峰, 所以每个发光单元都实现了良好的波

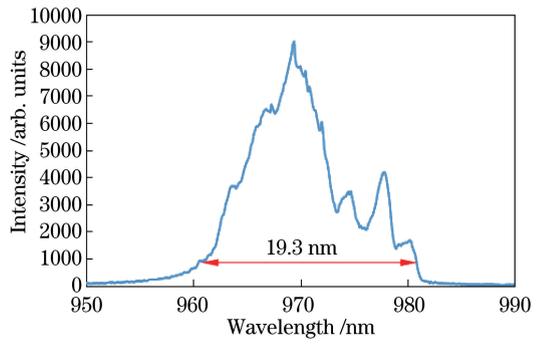


图 4 驱动电流为 70 A 时半导体激光叠阵自由运转的输出光谱
Fig. 4 Original emission spectrum of the two-diode stacks at a pump current of 70 A

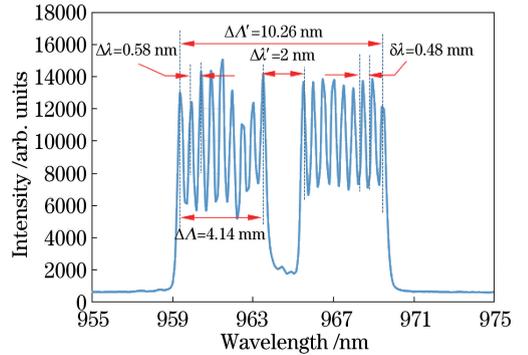


图 5 驱动电流为 70 A 时半导体激光叠阵无输出耦合镜光谱合束输出光谱

Fig. 5 Spectrum characteristics of the two-diode stacks after the coupler free SBC model at the pump current of 70 A

长锁定。在快轴方向(堆栈方向), 相应的发光单元(包括 6 个发光单元)锁定在相同的波长上, 所以图中每一个谱峰来自不同半导体激光阵列条上同一位置处的发光点。

输出光束的光谱特性与理论设计非常吻合。输出光束总光谱带宽为 10.26 nm, 相邻谱峰间隔 $\Delta\lambda$ 在 0.58 nm 左右, 锁频发光单元残余线宽 $\delta\lambda = 0.48$ nm, 两叠阵光谱簇间的光谱间隔 $\Delta\lambda' = 2$ nm。总输出谱宽与 10.03 nm 的设计值稍有不匹配, 一方面是由于衍射角度偏离 α_{Littrow} ; 另一方面, 不同半导体激光阵列条上同一位置的发光单元存在装调精度不够产生的定位误差, 这会使 6 个阵列条相同位置的合束单元锁定的中心波长有所偏差, 光谱叠加之后总输出有所增加, 此外两叠阵在定位时也存在装调精度不够导致的 P 值与设计值的偏差, 影响合束两叠阵间的波长间隔。

该光谱还表现出较高的谱峰间隔深度, 稳定发光点的谱线较为分立, 这说明采用反馈路径中放置望远镜系统的方法使外腔中发光点间串扰得到了有

效的抑制。但谱线并未完全分立,对比度为 50%左右,分析原因在输出耦合镜光栅外腔结构中,除望远镜系统对反馈光进行一次滤波之外,使用柱面外腔镜能够对合束光束进行二次准直。另外,在无输出耦合镜结构中,由反射镜 A 反射透过光栅的光束未经滤波直接作为反馈回到发光单元,产生该结构本身难以避免的固有串扰。

图 6 所示为 SBC 模式和自由运转模式下两个半导体激光叠阵的功率和电光特性。可以看出驱动电流为 70 A 时,实现了 578 W 的 SBC 输出功率和 46.5% 的电光转换效率(E-O PCE)。

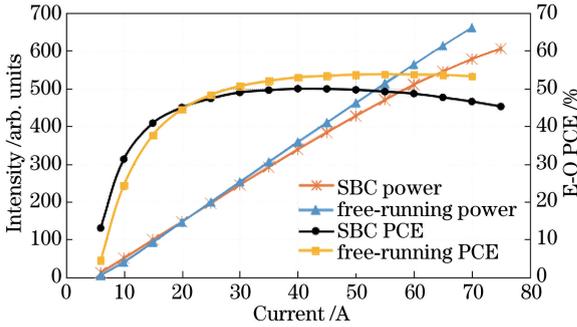


图 6 叠阵无输出耦合镜光谱合束系统的功率-电流特性和电光转换效率曲线

Fig. 6 Power-current characteristics and electro-optic conversion efficiency curves of the coupler free SBC system

与半导体激光器自由运转的情况相比,在 70 A 驱动电流下,合束输出光束的电光转换效率降低约 12.5%,原因为:1)光束到光栅上的入射角与光栅 Littrow 角存在偏差,导致光栅 1 级衍射效率下降,光栅衍射前后损失大量光功率;2)谐振腔内的光学器件吸收部分光功率引起附加吸收损耗;3)半导体激光器短阵列由封装等因素引入了“smile”效应,使得各个合束单元接收到的反馈强度不同,造成个别合束单元输出功率下降,同时产生不完全锁定和快慢轴光束质量退化;4)光束通过变换柱透镜 A 叠加到光栅时,像差导致各合束单元光斑不能完全重合,使得 0 级光束(透射光束)所携带的光源位置信息出现偏差,被变换透镜 B(同样存在像差)截取的反射镜 A 上的实像与光源本身有出入,当光源实像被反射离开反射镜 A 后第二次经过光栅,产生的衍射光束不能垂直入射到反射镜 B 上,该部分光束经过多次反射和衍射,发散角不断增大而溢出腔外,导致输出光束功率下降,此外因像差引起的光斑不完全重合,会导致反馈光束不能很好地回到原发光单元,进而产生发光单元间串扰,这也是图 5 所示谱峰不完

全分立的原因之一。

合束输出光束的光束质量 M^2 因子由近场和远场光斑大小确定。驱动电流为 70 A 时,在光栅位置处测得近场光斑快慢轴方向尺寸为 $9.8 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 。利用一焦距为 100 mm 的聚焦镜测量合束光束的远场光斑,用 CCD 测量聚焦镜焦平面处的输出光斑,远场光斑形状近似椭圆形,快慢轴尺寸分别为 $302.61 \mu\text{m} \times 134.29 \mu\text{m}$,如图 7 所示。

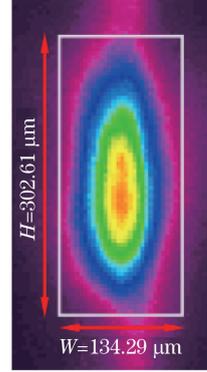


图 7 70 A 驱动电流下合束光束远场输出光斑

Fig. 7 Far-field spot of spectral combined beam with current 70 A

可以求得快慢轴的发散角分别为 $\theta_{\text{FA,OU}} = 1.5 \text{ mrad}$, $\theta_{\text{SA,OU}} = 0.67 \text{ mrad}$ 。光参数积和 M^2 因子计算公式为

$$Q_{\text{BPP}} = \theta\omega, \quad (10)$$

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} Q_{\text{BPP}}, \quad (11)$$

式中: Q_{BPP} 为光参数积; θ 为光束远场发散半角; ω 为光束束腰半径; λ 为光束中心波长。所以 SBC 输出光束慢轴和快轴的 M^2 因子分别为 23.6(光参数积 Q_{BPP} 为 $7.35 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) \times 19.3(光参数积 Q_{BPP} 为 $6.03 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$),基本实现了快慢轴方向光束质量的匀化。在自由运转模式下,单个发光单元在慢轴方向上的 M^2 值约为 14(光参数积 $4.4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$)。导致光束质量恶化的主要机制一是发光点间存在串扰,发光单元被部分锁定在寄生波长处,这部分光将不会被定向地合成到输出光束中,导致光束质量恶化;另一方面,单元光束存在残余线宽,由于光栅的角色散作用,与单色光束($\delta\lambda = 0$)相比,存在一定谱宽的光束经光栅衍射后输出光束发散角将增加,大角度发散光将导致光束质量恶化。另外考虑慢轴方向进行了一次两叠阵的空间合束,由反射镜引入的两个半导体激光叠阵之间的指向误差造成光束质量的恶化,基本保证了输出光束质量与单个合束单元的一致性。

4 结 论

基于无输出耦合镜光栅外腔光谱合束技术,实现了半导体激光器的光谱合束。利用两个短阵列条叠阵进行研究,与输出耦合镜光栅外腔结构相比,利用光栅 0 级光束实现了发光单元的有效反馈锁定,避免了 0 级光束的转储和浪费。通过在 0 级光路中放置柱面望远镜系统,较好地抑制了发光点间串扰对输出光谱及光束质量的影响,避免了输出光束被拦截的损耗。输出光谱由两簇共 18 个独立的尖峰组成,没有次峰或者毛刺出现,实现了驱动电流为 70 A 时 578 W 的 SBC 输出功率和 46.5% 的电光转换效率,光谱合束输出光束快轴和慢轴的 M^2 因子分别为 23.6 和 19.3,输出总谱宽为 10.26 nm。通过采用空间合束、偏振合束、密集光谱合束、粗谱合束、光纤耦合输出多路复用合束等多技术相结合的组合式合束结构,增加合束叠阵的数量,可实现功率的进一步提高。总之,以光谱合束技术为核心,能够在很大程度上改善直接输出半导体激光器的光束质量和亮度,是直接半导体激光器有前景的发展方向。

参 考 文 献

[1] Stickley C M, Filipkowski M E, Parra E, *et al.* Overview of progress in super high efficiency diodes for pumping high energy lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6104: 610405.

[2] Bachmann F. Goals and status of the German national research initiative BRIOLAS (brilliant diode lasers) [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6456: 645608.

[3] Fan T Y, Sanchez A, Daneu V, *et al.* Laser beam combining for power and brightness scaling [C] // Aerospace Conference, IEEE, 2000, 3: 49-54.

[4] Huang R K, Chann B, Burgess J, *et al.* Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO₂, and solid state lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8241: 824102.

[5] Huang R K, Chann B, Burgess J, *et al.* Teradiode's high brightness semiconductor lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9730: 97300C.

[6] Zimer H, Haas M, Nagel S, *et al.* Spectrally stabilized and combined diode lasers [C] // High Power Diode Lasers and Systems Conference, IEEE, 2015: 31-32.

[7] Zhu Z D, Gou L, Jiang M H, *et al.* High beam quality in two directions and high efficiency output of

a diode laser array by spectral-beam-combining [J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17804-17809.

[8] 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.

[9] Zhou Q, Zhou C H, Wei C L, *et al.* Diode laser array by spectral beam combining with a transmission grating [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10022: 1002217.

[10] Zhang Y, Zhang B. Analysis of the spectral beam combining efficiency of diode laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(5): 864-872.
张艳, 张彬. 半体激光器光束谱合成效率的分析 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 864-872.

[11] Meng H C, Wu D Y, Tan H, *et al.* Experimental study on high brightness and narrow band of diode laser by spectral beam combining of grating-external cavity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0302003.
孟慧成, 武德勇, 谭昊, 等. 窄光谱高亮度半导体激光器光栅-外腔光谱合束实验研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302003.

[12] Meng H C, Tan H, Li J M, *et al.* Development of spectral beam combining of diode laser by grating and external cavity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020003.
孟慧成, 谭昊, 李建民, 等. 半导体激光器光栅外腔光谱合束技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020003.

[13] Meng H C, Ruan X, Wang Z, *et al.* Spectral bandwidth narrowing of high brightness spectral beam combining diode laser [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 2675622.

[14] Yang L, Wu Z, Zhong Z Q, *et al.* Effect of crosstalk on combined beam characteristics in spectral beam combining systems [J]. Optics Communications, 2017, 384: 30-35.

[15] Meng H C, Ruan X, Du W C, *et al.* Scaling the spectral beam combining channel by multiple diode laser stacks in an external cavity [J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(4): 045811.

[16] Hengesbach S, Poprawe R, Hoffmann D, *et al.* Brightness and average power as driver for advancements in diode lasers and their applications [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9348: 93480B.