

基于 Mini-bar 叠阵的百瓦级光栅-外腔光谱合束 半导体激光光源

谭 昊^{1,2} 孟慧成^{1,2} 余俊宏^{1,2} 杜维川^{1,2} 王 昭^{1,2*} 郭林辉^{1,2}
田 飞^{1,2} 卢 飞^{1,2} 李建民^{1,2} 高松信^{1,2} 武德勇^{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 半导体激光器光栅-外腔光谱合束是一种实现高亮度半导体激光(DL)输出的有效方法。本文采用 mini-bar 叠阵作为合束光源,有效减小了“smile”效应对合束效率的影响,匀化了合束后的快慢轴光束质量,便于进一步的光纤耦合输出。采用柱面镜作为外腔镜,有效抑制了合束中的互锁现象,从而取代了传统的空间滤波,减小了系统规模。在工作电流为 75A 时得到了 159W 的高亮度 DL 输出,合束光谱宽度为 11.97 nm,电光效率为 47.35%。当工作电流为 60A 时,合束光的快慢轴光束质量分别为 3.145 mm·mrad 与 3.554 mm·mrad。

关键词 激光器; 半导体激光器; 光谱合束; 外腔; 光栅

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1114002

Hundred-watt Level Spectral Beam Combining Diode Laser Source Based on Mini-Bar Stack

Tan Hao^{1,2} Meng Huicheng^{1,2} Yu Junhong^{1,2} Du Weichuan^{1,2} Wang Zhao^{1,2*} Guo Linhui^{1,2}
Tian Fei^{1,2} Lu Fei^{1,2} Li Jianmin^{1,2} Gao Songxin^{1,2} Wu Deyong^{1,2}

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

Abstract Spectral beam combining is an effective way to realize high brightness direct semiconductor laser output. A hundred watt level spectral beam combining scheme based on mini-bar stack is demonstrated. Due to the lower “smile” effect of mini-bar and equal beam quality in both axis of mini-bar stacks, this mini-bar stack based spectral beam combining scheme have more effective optical feedback compared to the standard cm-bar based spectral beam combining scheme. A cylindrical mirror as the output mirror to restrain the cross-talk between emitters is utilized instead of using a traditional spatial filter, which will also lower the system size. A spectral beam combining output of 159 W is achieved, with an electro-optical efficiency of 47.35% and spectral width of 11.97 nm. At the operating current of 60A, the beam quality of 3.145 mm·mrad (fast axis) and 3.554 mm·mrad (slow axis) is demonstrated by spectral beam combining.

Key words lasers; semiconductor laser; spectral beam combining; external cavity; diffraction grating

OCIS Codes 140.5960; 140.2020; 050.1950

1 引 言

半导体激光器(DL)的光栅-外腔光谱合束技术(SBC)是综合了外腔半导体激光器与波分复用技术优点的一种新型技术。与空间拼接、偏振合束等传统的光束合束技术相比,SBC技术的优势在于实现单个合束单元的光

收稿日期: 2015-07-20; 收到修改稿日期: 2015-08-13

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(HEL2015-05)

作者简介: 谭 昊(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事半导体激光光束合成方面的研究。E-mail: tanhaomf@163.com

*通信联系人。E-mail: wz870815@163.com

谱锁定和所有合束单元的共轴输出,合束后的光束质量等同于单个发光单元在外腔注入锁定时的光束质量。SBC技术具有很好的定标放大能力,是一种有希望实现高亮度半导体激光光源直接应用的有效方式^[1]。

SBC技术最早由美国MIT Lincoln实验室^[2]于2000年提出,经过十多年的发展,已经成为了研究DL直接应用技术的一大热点。目前,国际上开展相关研究的单位主要有美国MIT Lincoln实验室、丹麦技术大学、Fraunhofer实验室、德国波茨坦大学、中央佛罗里达大学、美国TeraDiode公司、美国Alfalight公司、美国Aculight公司、美国Coherent公司等。其中,美国的TeraDiode公司^[3]基于SBC技术已实现输出为2000 W,光束参量积(BPP)为 $3.75 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的直接输出DL的报道,美国Alfalight^[4]则在2012年报道了基于7个光纤耦合输出200 W的SBC模块,作为抽运源实现了波长为1080 nm单模连续1kW近衍射极限的光纤激光输出。

国内的研究单位则主要有长春光学精密机械研究、北京工业大学、四川大学与中国物理研究院十所等单位。长春光学精密机械研究^[5-7]主要开展了基于透射式平面衍射光栅的SBC研究,基于3个标准厘米bar实现了140.6W的光谱合束输出,基于单个bar条获得了高光束质量高效率50.8 W的光谱合束输出,并基于缩束方式开展了压缩光谱宽度的光谱合束实验;北京工业大学^[8-10]针对SBC的开环、闭环结构开展了相关工作,并基于单个标厘米Bar与光束转换器(BTS)实现了58.8 W的光谱合束输出;四川大学^[11-12]就光谱合束的光束特性与效率方面开展了理论分析工作;中物院十所^[13]则基于单个标准条与DL叠阵实现了谱宽为3.24nm的DL光谱合束输出。

本文采用一个970 nm的mini-bar叠阵作为合束光源,实现了最大功率为159W的光谱合束激光输出,系统整体电光效率最高为48.35%,光束质量分别为 $3.145 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (快轴)与 $3.554 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (慢轴)。

2 原理与实验设计

相对于标准厘米bar的SBC结构,mini-bar叠阵的SBC结构有如下三个优点:一是mini-bar的“Smile”效应相比于CM-Bar更好控制,而更小的“Smile”效应则确保了更加有效且一致的外腔反馈注入;二是mini-bar有着更小的慢轴尺寸,而合束输出的光谱宽度与DL慢轴方向的尺寸呈正比关系,因此在同样的合束输出的光谱宽度条件下,基于mini-bar的结构所需要的转换透镜焦距更短,可以有效地控制SBC结构的大小;三是可以通过DL芯片沿快轴方向上的堆叠,均化合束激光的快慢轴光束质量,便于进一步的光纤耦合输出。

由于DL上各个发光单元的输出光经过外腔镜反馈后,不仅将垂直于外腔镜的光束反射至光栅并由光栅衍射回发光单元中形成反馈锁定,同时与合束光轴有微小角度偏差的光束也反射至光栅并衍射回发光单元中。由于角度有一定偏差,因此这些回光并不会反馈回原发光单元中,而是反馈至相邻的发光单元中并形成稳定的反馈锁定,这就是发光单元间的互锁定现象。表现为合束输出光的远场两侧分别出现 $n-1$ (n 为DL中发光单元个数)个旁瓣以及明显的次峰,严重影响了合束激光的光束质量。

要解决互锁定问题,通常采用的方式是在光栅与外腔镜间加空间滤波^[14]。但空间滤波会直接增加系统的复杂程度,结合上述提到的互锁定产生原因,设计并采用了将外腔镜的反射面加工为具有较大曲率半径的柱面的方式,代替空间滤波系统滤除与合束输出光轴有微小角度偏差的光,达到抑制发光单元间互锁定的目的。

基于mini-bar叠阵的光栅-外腔光谱合束结构如图1所示。整个系统包括由3个mini-bar沿快轴方向堆叠而成的DL叠阵,有效焦距分别为1 mm与3 mm的快轴准直透镜(FAC)与慢轴准直透镜(SAC),焦距为150 mm的转换透镜,刻线数为1600 line/mm的透射光栅与反射率为10%、焦距为800 mm的柱面腔镜。其中,mini-bar的具体参数如表1所示。

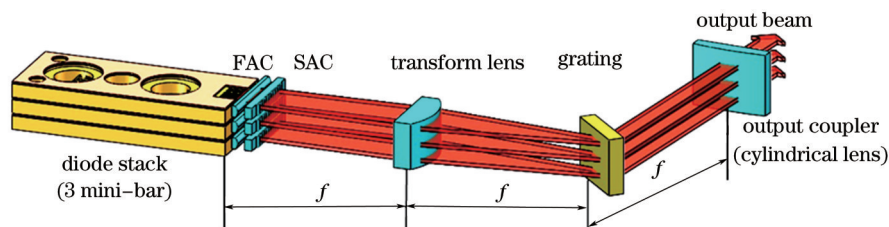


图1 基于3个 mini-bar 叠阵的光栅-外腔光谱合束结构示意图

Fig.1 Scheme of 3 mini-bar DL stacks spectral beam combining system

表1 970 nm的mini-bar参数表
Table 1 Parameters of 970 nm mini-bar

Parameter	Central wavelength λ /nm	Chip width W_c /mm	Cavity length L /mm	Number of emitters	Emitter width W_E / μm	Emitter pitch P / μm	Operating current I /A	Front facet reflectivity	Polarization
Values	970	4.5	3	9	100	500	70	< 0.001	TE

合束时 DL 和光栅分别位于转换透镜的前后焦面,外腔镜垂直于光栅衍射的-1级方向,不同发光单元的输出光通过转换透镜后,将空间位置转换成不同的入射角度投射到光栅上,再经光栅衍射后以相同的角度衍射,从而实现合束输出。由于外腔镜的部分反馈作用,垂直于外腔镜的那部分光束按一定比例反馈后,再次经过光栅和转换透镜注入 DL 中。这样 DL 的后端面与-1级衍射方向的外腔镜形成一个谐振腔,反馈注入的光束与有源区的光场进行耦合,使得各个激光纵模间产生增益差,让满足振荡阈值条件的纵模被激发起振,在外谐振腔形成有效振荡,而其他纵模则被抑制。

因此外腔锁定后每个发光单元的输出光和衍射光束均满足光栅方程

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

式中 d 为光栅周期, $m=-1$, θ_i 与 θ_d 分别为光栅入射角与光栅衍射角, λ_i 为 DL 上第 i 个发光单元的输出波长。为了获得最高的衍射效率, DL 上中心位置发光单元的入射角(记为 θ_0)应当等于光栅的 Littrow 角,即 $\theta_0 = \theta_{\text{Littrow}}$, 那么衍射角 $\theta_d = \theta_{\text{Littrow}}$ 。实验使用的光栅的设计波长为 976 nm, 刻线数为 1600 line/mm, 且在 976 ± 15 nm 内均有大于 94% 的衍射效率, 即有 $\theta_0 = \theta_d = \theta_{\text{Littrow}} = 51.3^\circ$ 。因此可以得到第 i 个发光单元的入射角 θ_i 为

$$\theta_i = \theta_{\text{Littrow}} + \arctan \frac{i \cdot p}{f}, i = (-4 \cdots 4), \quad (2)$$

式中 p 为发光单元的中心间距, f 为转换透镜焦距, 两者的值分别为 0.5 mm 与 150 mm。由(1)式与(2)式可以得到每个发光单元的中心波长为

$$\lambda_i = d \cdot \left\{ \sin(\theta_{\text{Littrow}}) + \sin \left[\theta_{\text{Littrow}} + \arctan \left(\frac{i \cdot p}{f} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

考虑到转换透镜焦距 f 远大于 $i \cdot p$, 因此可以认为

$$\arctan \frac{i \cdot p}{f} \approx \frac{i \cdot p}{f}, \quad (4)$$

那么(3)式就可以简化为

$$\lambda_i = d \cdot \left[\sin \left(\theta_{\text{Littrow}} + \frac{i \cdot p}{f} \right) + \sin(\theta_{\text{Littrow}}) \right], \quad (5)$$

相邻发光单元间中心波长的间隔则为

$$\Delta \lambda_i = \frac{d \cdot p}{f} \cos \left(\theta_{\text{Littrow}} + \frac{i \cdot p}{f} \right). \quad (6)$$

由(5)与(6)式可以计算出, 最终合束输出光束的光谱宽度为 11.72 nm。

3 实验结果

在 70A 的额定工作电流下, DL 自由运转与合束输出激光的输出光谱分别如图 2 和 3 所示。可以看到光谱由 9 个独立的谱峰组成, 分别对应 mini-bar 上的 9 个发光单元, 整体光谱宽度为 11.97 nm, 与上节的计算值基本相符。由于芯片制作与叠阵组装必然存在微米量级的误差, 会造成 3 个 mini-bar 沿慢轴方向的错位, 如图 4 所示。这在输出合束光谱中就体现为总体光谱宽度计算值与实际值的偏差, 以及每个独立谱峰谱宽的不一致。另外, 每个独立谱峰的谱强度较为一致且没有次峰出现, 这得益于 mini-bar 的“Smile”效应易于控制的特点, 并证明了柱面腔镜抑制互锁定的有效性。

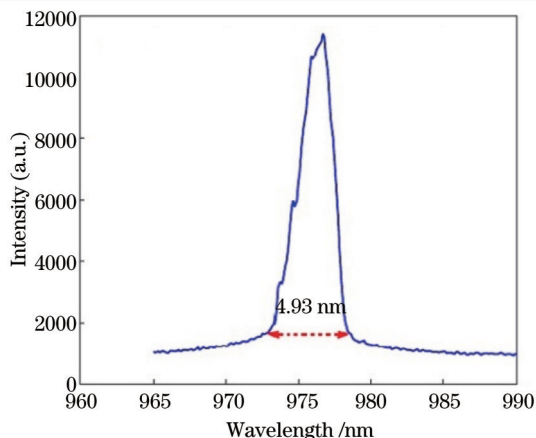


图2 Mini-bar 叠阵自由运转时的输出光谱
Fig.2 Original spectrum characteristics of mini-bar stack in free running mode

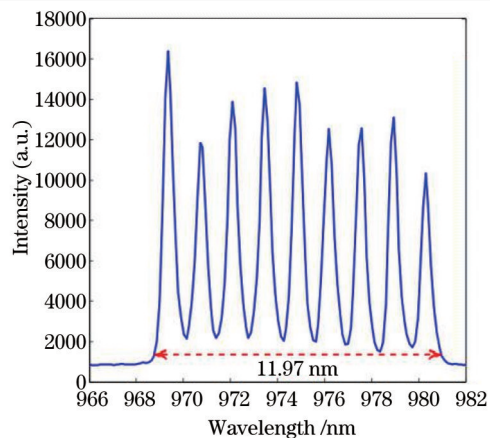


图3 基于 mini-bar 叠阵的光栅-外腔光谱合束输出光谱
Fig.3 Spectrum characteristics of mini-bar stack based spectral beam combining output

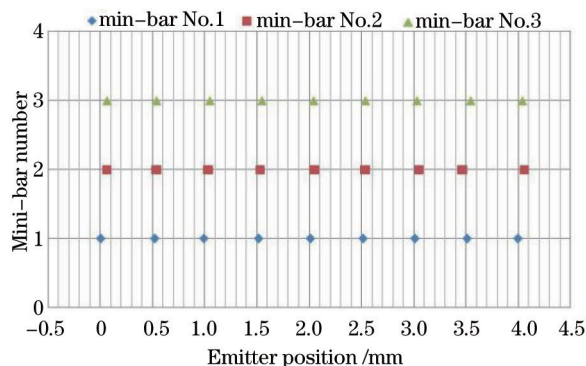


图4 mini-bar 叠阵中各个发光单元的位置
Fig.4 position of each emitter on mini-bar stack

经测试,基于 mini-bar 叠阵的 SBC 系统的输出功率-电流($P-I$)特性与转换效率如图 5 所示。当工作电流为 75A 时,得到了 159 W 的合束光输出,此时的电光效率为 47.35%,亮度约为 $89.15 \text{ MW/cm}^2\text{-str}$ 。可以看出,合束系统的起振阈值要明显低于 mini-bar 叠阵自由运转时的起振阈值,再结合光谱特性可知系统已经形成有效的外腔反馈注入,实现了基于 mini-bar 叠阵的光谱合束激光输出。叠阵的电光效率比未加外腔时(约 62%)有一定程度的降低,影响电光效率的原因有如下三点:一是光栅的衍射造成腔内损耗,其衍射效率最高约为 94%;二是 10% 的外腔镜反射率,这个值大于通常 DL 芯片前腔面的反射率(通常为 2~5% 之间),但高的外腔镜反射率有助于实现较好的反馈锁定,从而更好地抑制腔内由其他反射界面与芯片后腔面形成的耦合腔;三是由“Smile”效应导致的各发光单元反馈强度不同,使得部分发光单元并未完全锁定。虽然实验中采用了 mini-bar 作为光源,由封装焊接引入的“Smile”效应得到了很大改善(通常标准厘米 bar 可以做到小于 $1 \mu\text{m}$,而 mini-bar 基本可做到小于 $0.5 \mu\text{m}$),但仍然无法完全消除。“Smile”效应及其影响如图 6 所示^[15],由于实验上是对沿慢轴方向的光束进行合成,对快轴方向的光束并无任何改变,因此,沿快轴方向的反馈可以近似看作一个简单的几何光学过程。那么“Smile”效应就会导致反馈回光在沿快轴方向上有一个微小位移量,从而影响反馈光的耦合效率。“Smile”效应对 DL 快轴准直后发散角的影响公式^[15]

$$\theta_{\text{smile}} = \theta_{c,y} + \frac{\Delta y}{f_{\text{FAC}}}, \quad (7)$$

式中 θ_{smile} 为考虑了“Smile”效应后的快轴发散角, $\theta_{c,y}$ 为不考虑“Smile”效应的快轴发散角, Δy 为“Smile”大小, f_{FAC} 为快轴准直透镜焦距。可以计算出叠阵中“Smile”效应(测得最大为 $+0.35 \mu\text{m}$)导致的反馈回光沿快轴方向的位移量约为 0.315 mm,而经快轴准直后 DL 输出光沿快轴方向的尺寸也仅有 0.8 mm 左右。因此,在后续工作中,可以考虑在外腔沿快轴方向增加芯片前腔面—外腔镜—芯片前腔面构成的成像系统,让 DL 前腔面

与外腔镜间形成 1:1 的互成像关系。不仅可以修正“Smile”效应带来的反馈光耦合效率降低,还可消除因反馈光在传播数百毫米后在快轴方向的自然发散所导致的耦合效率下降问题。

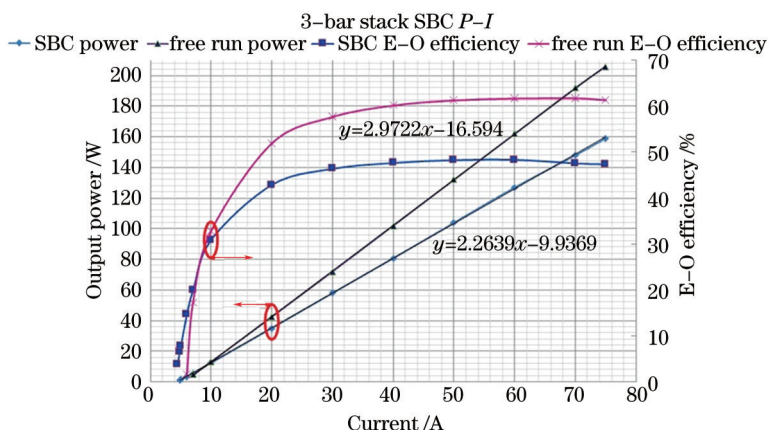


图5 合束输出的P-I特性与电光效率曲线

Fig.5 P-I curve and electro-optical efficiency of SBC output



图6 “Smile”效应及其影响示意图

Fig.6 Scheme of “smile” effect and its influence

采用 M^2 仪对合束输出激光的光束质量进行测量,得到合束输出激光束沿原快轴与慢轴方向上的光束质量分别为 $3.145 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 与 $3.554 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,如图7所示,此时的工作电流为 60 A 。当电流继续升高时,光束质量会有些许的退化,特别是慢轴方向,光束质量会退化至 $4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 以上。

自由运转下单个发光单元在慢轴的光束质量约为 $3.05 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,而理论上合束光慢轴方向的光束质量应与其一致。影响合束光束质量的原因主要有如下几点:一是透射式柱面透镜作为转换透镜所引入的像差,导致各发光单元在光栅处的光斑并不是完全重合,造成整体光束尺寸增加从而影响合束光束质量;二是由于控制精度问题,芯片封装与叠阵组装必然会导致芯片的慢轴之间存在一定的指向偏差,这个偏差也会造成如原因一所述的问题,影响合束光束质量;三是随着工作电流的提升,DL的发散角也会不断增加,光束质量也会随之退化,这使得在工作电流很高的情况下,合束光束质量难以保持在较低电流时的水平。

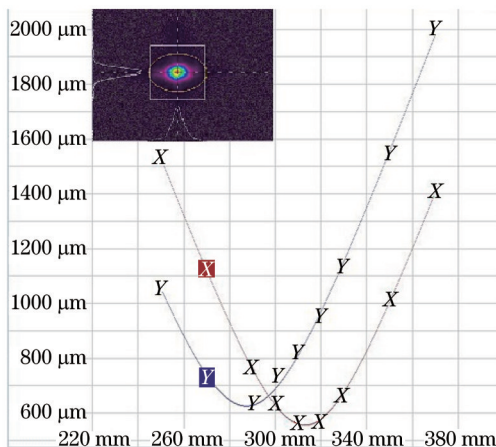


图7 合束输出光的光束质量测试结果

Fig.7 Beam quality of SBC output

4 结 论

本文基于半导体激光器光栅-外腔光谱合束方法与 mini-bar 叠阵, 实现了百瓦级高光束质量半导体激光输出。且具备一定的可定标放大能力, 可在保持光束质量不变的情况下, 增加慢轴方向参与合束的叠阵的数量与采用偏振合束可以将输出功率提升至千瓦级。实验采用 mini-bar 作为合束光源, 降低 DL 芯片封装引入的“Smile”效应, 有效提升了外腔反馈注入的一致性; 在半导体激光光栅-外腔光谱合束结构中引入柱面透镜作为外腔镜, 抑制了发光单元间的互锁定现象。最终得到了最高输出功率为 159 W, 谱宽为 11.97 nm, 电光效率为 47.35% 的半导体激光光栅-外腔光谱合束输出, 亮度约为 $89.15 \text{ MW/cm}^2\text{-str}$, 并且合束光束可以被耦合进入芯径为 $50 \mu\text{m}$ 、NA 为 0.2 的光纤中。

参 考 文 献

- 1 Meng Huicheng, Tan Hao, Li Jianmin, *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.
- 2 Fan T Y, Sanchez A, Daneu V, *et al.*. Laser beam combining for power and brightness scaling [J]. *IEEE Aerospace Conference*, 2000, 3:49-54.
- 3 Huang R K, Chann B, Burgess J, *et al.*. Direct diode lasers with comparable beam quality to fiber, CO₂, and solid state lasers[C]. *SPIE*, 2012, 8241: 824102.
- 4 Xiao Y, Brunet F, Kanskar M, *et al.*. 1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks[J]. *Optics Express*, 2012, 20(30): 3296-3301.
- 5 Zhang Jun, Peng Hangyu, Cao Junsheng, *et al.*. 970 nm hundred-watt level diode laser source by spectral beam combining with external cavity feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1114001.
张俊, 彭航宇, 曹军胜, 等. 970 nm 百瓦级半导体激光外腔反馈光谱合束光源[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1114001.
- 6 Zhang J, Peng H Y, Fu X H, *et al.*. CW 50W/M²=10.9 diode laser source by spectral beam combining based on a transmission grating [J]. *Optics Express*, 2013, 31(3): 3627-3632.
- 7 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.
- 8 Liu Bo, Zhang Xue, Han Junting, *et al.*. Wavelength beam combining of laser diode array by wavelength-chirped volume Bragg grating external cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(7): 1057-1062.
刘波, 张雪, 韩军婷, 等. 波长啁啾体布拉格光栅外腔实现激光二极管阵列的波长光束组合[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(7): 1057-1062.
- 9 Liu Bo, Li Qiang, Zhang Xue, *et al.*. Wavelength beam combining of laser diode array to get 20 W CW circle spot emission[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1633-1638.
刘波, 李强, 张雪, 等. 808 nm 激光二极管阵列波长光束组合 20W 输出[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(11): 1633-1638.
- 10 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.
- 11 Zhang Yan, Zhang Bin, Zhu Songjun. Analysis of the property of the beam after spectral beam combining[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4590-4595.
张艳, 张彬, 祝颂军. 谱合成光束特性的模拟分析[J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 4590-4595.
- 12 Zhang Yan, Zhang Bin. Analysis of the spectral beam combining efficiency of diode laser[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2009, 38(5): 864-872.
张艳, 张彬. 半导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.
- 13 Meng Huicheng, Wu Deyong, Tan Hao, *et al.*. Experimental study on high brightness and narrow band of diode laser by spectral beam combining of grating-external cavity[J]. *Chinese J 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.
- 14 Chann B, Huang R K, Missaggia L J, *et al.*. High-power near-diffraction-limited wavelength-beam-combined diode arrays[C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics*, 2005: CMX7.
- 15 Poprawe R, Loosen P, Bachmann F. *High Power Diode Lasers: Technology and Applications*[M]. New York: Springer-Verlag, 2007: 134-135.

栏目编辑: 宋梅梅