

文章编号: 1001-4322(2009)11-1633-06

808 nm 激光二极管阵列波长光束组合 20 W 输出*

刘 波, 李 强, 张 雪, 惠勇凌, 韩军婷, 姜梦华, 庞 恺

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘 要: 基于多波长光束组合技术, 利用光栅的衍射和外腔的反馈, 将激光二极管阵列(LDA)发光单元锁定在不同的波长上, 以近似平行光束沿光栅的-1 级衍射方向组合输出, 改善 LDA 输出光束质量。实验采用发光单元宽度为 100 μm 、周期为 500 μm 、由 19 个单元构成的 1 cm 普通商用 LDA, 在连续运行最大注入电流 60.6 A 时, 自由运转输出功率 49.8 W 时, 获得功率为 20.1 W 的组合光束稳定输出, 其光谱宽度为 15 nm, 对应的远场发散角由约 70 mrad 变为 1.66 mrad, 改善后光束质量因子约为 32, 其值与单个发光单元的光束质量相当。

关键词: 激光二极管阵列; 光谱光束组合; 波长光束组合; 衍射光栅

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A

随着光纤激光器和全固态激光器的快速发展, 对半导体激光泵浦源的要求也越来越严格, 主要表现在对泵浦源的亮度要求越来越高, 这就意味着泵浦源的输出光纤应具有更细的芯径。实现这个要求的决定性指标是光束质量, 它直接制约着远场亮度、聚焦后的焦点功率密度及用光纤导光所能达到的效率。而目前商用激光二极管阵列(LDA)输出光束在快轴方向的光束质量因子 M^2 接近 1, 在慢轴方向的 M^2 超过 2 000^[1], 自由运转时光谱峰值半宽一般为 2~3 nm。半导体激光这种大像散、大发散角的特点已成为实现输出光耦合进小芯径光纤所面临的巨大瓶颈。

目前, 改善 LDA 输出光光束质量的方法归纳起来主要有: 光束整形、外腔锁相和波长光束组合 3 种。采用光束整形^[2-3]可以有效改善 LDA 的光束质量, 但这种方法依靠均衡快慢轴的光参数积(BPP)来改善光束质量, 不能获得近衍射极限的输出光束。采用外腔锁相^[4-8]可以同时改善 LDA 输出光束的光束质量和相干性, 也能获得近衍射极限的输出光束, 但外腔锁相需要精确控制各个单元的波长和相位, 调节难度较大且难以获得大功率单瓣模稳定输出。采用波长光束组合^[9-17]可以有效改善 LDA 输出光束质量, 获得近衍射极限的输出光束, 且各个单元可以独立调节而不需对其相位、偏振态以及振幅进行控制, 易实现大功率稳定输出, 并且组合光束光强分布不随组合单元数而变化, 在远场和近场均能保持较好的叠加。本文介绍了波长光束组合或光谱光束组合(WBC)技术的基本结构和原理, 采用普通商用的 LDA(单个单元 $M^2_{x,y}$ 为 16~50)利用外腔光束组合结构来改善输出光的光束质量, 实验获得 20.1 W 的输出光束, 其组合输出光束质量因子 $M^2_{x,y} = 32$, 这与单个发光单元的光束质量大致相当。

1 多波长光束组合结构与原理

如图 1 所示, 实验装置由 LDA、柱透镜、衍射光栅和外腔镜(部分输出耦合镜)构成。将 LDA 置于柱透镜的前焦面, 衍射光栅置于柱透镜的后焦面, 柱透镜的焦距为 f , 外腔镜垂直于衍射光栅的 1 级衍射方向放置。阵列的中心单元与柱透镜的中心光轴、光栅的中心在同一条直线上。不同发光单元的出射光束通过柱透镜转化后以不同的入射角入射至光栅上。由于光栅的波长选择作用, 经光栅衍射后的光束以相同的衍射角被 1 级

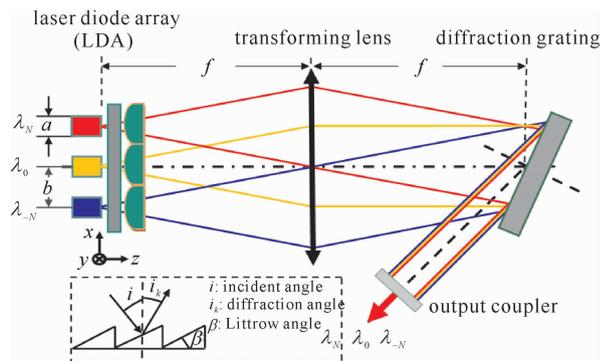


Fig. 1 Schematic of wavelength beam combining(WBC)

图 1 波长光束组合示意图

* 收稿日期: 2008-06-26; 修订日期: 2009-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(10276003); 北京市自然科学基金重点项目(4051001)

作者简介: 刘 波(1981—), 男, 硕士, 从事半导体激光器光束组合技术研究; sarliubo@hotmail.com.

衍射至外腔镜,由于外腔镜的部分反馈作用,沿外腔镜法线入射到外腔镜上的这部分光束将再次经衍射光栅和柱透镜后回到阵列。这样,LDA 的后端面与-1 级衍射方向的外腔镜形成新的谐振腔,垂直于外腔镜的光将在 LDA 的后端面和外腔镜之间形成振荡。调节外腔镜使之垂直于衍射光栅的 1 级衍射方向(Littrow 角附近),由于光栅的波长选择作用,阵列中的每个单元将收到自己单元的输出反馈。反馈的作用迫使 LDA 的每一个单元激发出具有与注入反馈相同波长的激光输出。这样,锁定后的 LDA 的各个单元激发出的波长略微不同的子光束经柱透镜后转化为不同倾角的子光束再入射到衍射光栅上。利用光栅的衍射作用将这些波长和入射角不同的子光束合成为一束以相同衍射角通过外腔镜输出的光束。很明显,LDA 各单元的输出光束将沿中心单元在光栅上的光束输出位置实现空间叠加,即功率叠加。叠加后的输出光束与阵列中心单元的输出光具有近似相同的光束质量。这样,根据空间亮度的计算式^[18]可知,组合输出光空间亮度较之组合前会明显增加,以实现 LDA 输出光束质量的改善,但这是以牺牲光谱亮度(光谱展宽)为代价。

柱透镜的作用是将不同位置的子光束转化成不同倾角的子光束入射到光栅上,每束子光束的波长由该阵列单元的位置和光栅方程严格确定。衍射光栅则是将不同波长、不同入射角的子光束以相同的出射角衍射,使组合光束在近场和远场均保持叠加。外谐振腔由 LDA 后端面和部分输出耦合镜构成。部分输出耦合镜反射一部分功率至光栅上,经光栅的二次反射回到每个发光单元。外谐振腔和衍射光栅共同确保返回到阵列每个发光单元均为锁定波长,从而使得从外腔镜反射回到阵列各单元的光束由于模式失配带来的损失降到最小,以确保整个阵列单元稳定的波长锁定和高效率组合,从而保证了组合光束的输出功率和光束质量。

建立以阵列中心单元为坐标原点,沿阵列慢轴方向为 x 方向的坐标轴,如图 1 所示。设阵列由 $2N+1$ 个发光单元构成,单元间间距为 b ,单元宽度为 a ,整个阵列的长度为 L ,中心单元在注入锁定后波长为 λ_0 ,则沿 x 正方向第 n 个发光单元的中心坐标是 nb ,其注入锁定的波长是 $\lambda_0+n\Delta\lambda$,其中, $\Delta\lambda$ 是相邻单元注入锁定后出射光束中心波长的差值。

所有发光单元的出射光束经过柱透镜照射在衍射光栅上均满足

$$d(\sin i + \sin i_k) = k\lambda \quad (1)$$

式中: d 是光栅的周期; i 是不同发光单元的出射光束经过柱透镜后与光栅法线的夹角,不同的发光单元, i 具有不同的值; i_k 是不同发光单元的出射光束被光栅衍射后第 k 级衍射光束与光栅平面法线的夹角。当 $k=1$ 时衍射光束为平行光,即所有发光单元在-1 级衍射方向具有相同的出射角度 i_k ,则对式(1)微分可得

$$d\Delta i \cos i = \Delta\lambda \quad (2)$$

式中: Δi 表示相邻发光单元在注入锁定时,出射光束经过柱透镜变换后与光栅法线夹角的差值。由于 $b \ll f$,则 $\Delta i \approx b/f$,此时式(2)可以简化为

$$\Delta\lambda = \frac{db}{f} \cos i \quad (3)$$

x 正方向上第 n 个发光单元在注入锁定后的波长为

$$\lambda_n = \lambda + ndb \cos i / f \quad (4)$$

整个阵列在注入锁定后波长的展宽可以表示为

$$\lambda_N - \lambda_{-N} = 2Nbd \cos i / f \approx Ld \cos i / f \quad (5)$$

其中 $2N+1$ 为 LDA 单元总数,在本文中 $2N+1=19$ 。从式(3)可以看出:在阵列参数、光栅入射角一定的情况下,柱透镜焦距越长,各子光束相对于光栅的入射角越小,各子光束中心波长的差值也越小,从而可使合成光束的谱宽减小,即随着柱透镜焦距的增大,组合光束谱宽减小。因此,在实际应用中,可以通过适当增大柱透镜焦距来减小各子光束中心波长的间隔,使组合光束在给定谱宽情况下,能容纳尽可能多的阵列单元,以实现更高的合成功率。

2 实验装置

图 2 是波长光束组合的实验装置示意图。LDA 置于柱透镜的前焦面上,衍射光栅中心置于柱透镜的后焦面上,观测仪器置于光栅的-1 级衍射方向。实验用的 LDA 芯片是国 JOLD 公司制造商用的(CW)激光二极管阵列,由 19 个发光单元构成,实际只有 18 个单元发光,单元宽度 $100 \mu\text{m}$,相邻单元中心间距离 $500 \mu\text{m}$,中心波长 808 nm ,光谱带宽(FWHM)为 $3\sim 5 \text{ nm}$,阵列后端面镀高反膜,前端面镀一定的减反膜(使 LDA 输出

端面镀射的膜层反射率小于 5%)。阵列输出光分别采用柱面微透镜、微透镜阵列进行快慢轴准直。准直后快轴方向为近衍射极限,而慢轴方向发散角约为 4°(约 70 mrad)。柱透镜为普通 K9 玻璃的平凸柱面镜,其焦距为 200 mm,镀有宽带增透膜。衍射光栅是一个以微晶玻璃为基底材料、周期为 2 000 g · mm⁻¹的镀金全息光栅,光栅的一级衍射效率大于 90%。根据方程式(1),当 $i = i_k$, $\lambda = 808 \text{ nm}$ 时,可以计算出衍射效率最高处光栅对应的入射角(即 Littrow 角)为 53.9°,外腔镜放置于光栅 -1 级衍射方向,外腔镜是部分反射镜,其反射率为 30%。考虑到光栅的衍射效率,取入射角 $i = 54^\circ$ 时调节好实验装置。实验采用功率计和光谱仪分别测量 LDA 输出光束的功率和频谱,采用光束质量诊断仪测量光束输出形貌。

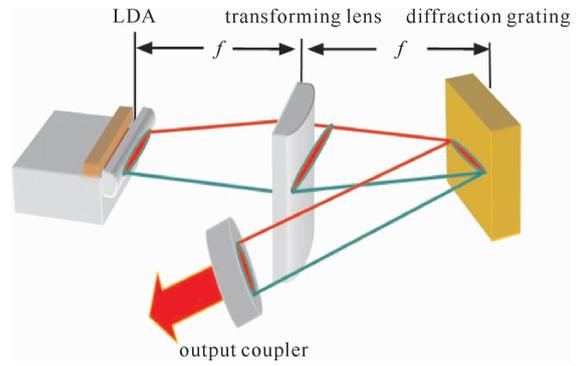
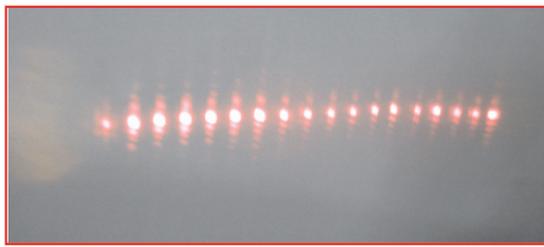


Fig. 2 Experimental setup of WBC

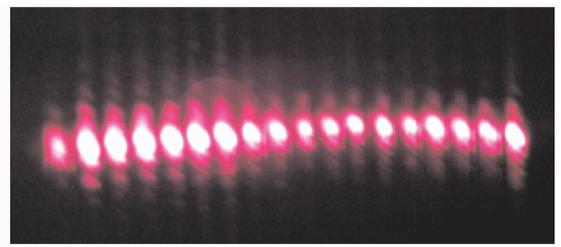
图 2 WBC 的实验装置示意图

3 实验结果及分析

实验首先观测了阵列自由运转时的输出情况。在注入电流分别为 20 和 40 A 时,阵列 18 个发光单元输出光如图 3 所示。由图 3 可以看出:整个 LDA 的边缘弯曲较小,smile 效应较小,约为 3 μm,但各个单元发光亮度不一致,这是由于各个单元出光阈值不同导致的。测量阵列自由运转时,注入电流为 40 A 时,LDA 输出光的频谱如图 4 所示,光谱峰值半宽(FWHM)为 1.66 nm。



(a) injection current: 20 A



(b) injection current: 40 A

Fig. 3 Smile effect of LDA in far field at injection current of 20 A and 40 A

图 3 在注入电流为 20 和 40 A 时激光二极管阵列远场的 smile 效应

在 $i = 54^\circ$ 时,按图 2 调整反馈光束至稳定锁定状态,对锁定后各阵列单元输出光束的频谱进行了测量,其结果如图 5 所示。由图可见:光谱宽度由自由运转时的 1.66 nm 展宽为 15 nm,光谱峰数为 16 个,光谱间隔均匀,各锁定光谱峰间隔约 0.75 nm,整个阵列组合锁定频谱非常稳定;频谱整体上下有微小的波动,但没有左右漂移现象,整个锁定光谱图中除了锁定光谱外,每个峰与峰之间还有一些小峰,根据模式竞争理论,这是由于 LDA 子腔和外腔决定的模式会有一定程度的竞争引起的,当外腔决定的模式在子腔决定的模式竞争中占主导时,LDA 阵列将以外腔决定的模式工作,否则两者会以一定程度的竞争共存。实验中小峰的存在也是对子

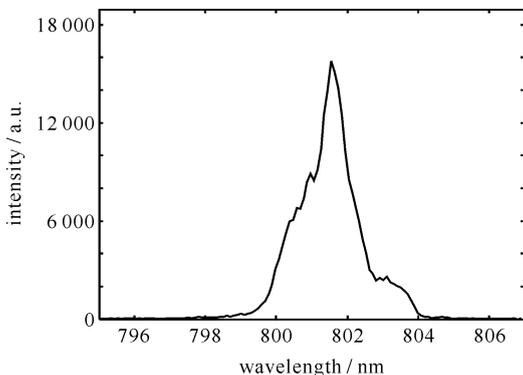


Fig. 4 Spectral profile of free operating LDA

图 4 LDA 自由运转的光谱分布

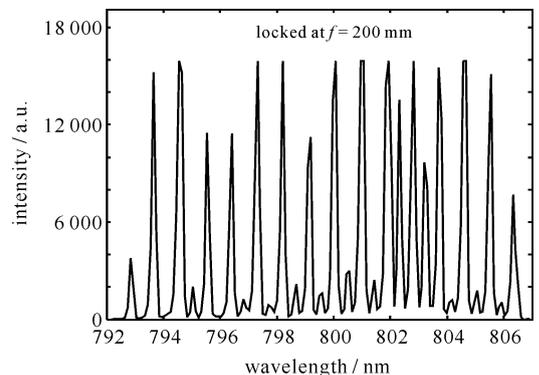


Fig. 5 Spectral profile of WBC of LDA after locking

图 5 LDA 多波长光束组合锁定状态下的光谱分布

腔的抑制不完全所致。因此,实验中需要精细调节柱透镜,使 LDA 和光栅分别处于柱透镜的前后焦面上,以使得各子光束经柱透镜后在光栅面上的光斑(组合光束光斑)尺寸最小,保证组合光束的输出功率和光束质量,从而保证组合光束的亮度。

在注入电流为 60.6 A 时,测量结果如图 6 所示。通过图 6 可知:组合光束在外腔镜面上和距镜面 150 cm 后的宽度分别为 10,15 mm。可以计算出光束发散角为 1.66 mrad。该光束通过一个焦距为 65 mm 的聚焦镜,用光束质量诊断仪 CCD 测量在聚焦镜的焦平面处的输出光斑,光斑形状近圆形,直径约为 0.08 mm,如图 7 所示。根据图 6 中各自位置光斑大小和外腔镜上面输出光斑大小,可以计算出此时输出光束光束质量因子 $M_{x,y}^2=32$,其值与单个发光单元的光束质量($M_{x,y}^2=16\sim 50$)大致相当。

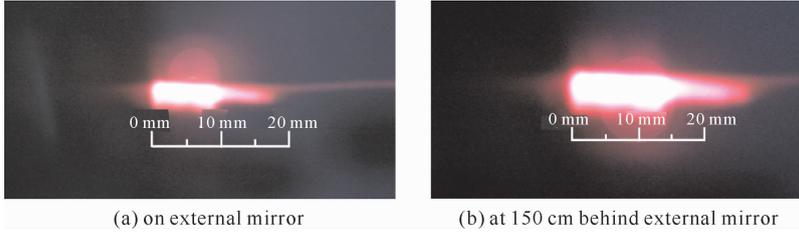


Fig. 6 Output spots of WBC on and at 150 cm behind external mirror with injection current of 60.6 A

图 6 注入电流为 60.6 A 时组合后外腔镜上面和外腔镜后 150 cm 处屏上输出光斑

光束入射角为 54° 时,二极管激光阵列在自由运转下,利用 WBC 技术准直后的输出功率和波长光束组合的输出功率如图 8 所示。从图 8 中可以看出:在注入电流为 60.6 A 时,LDA 自由运转输出功率是 49.8 W,波长光束组合输出功率是 20.1 W,组合效率为 40.36%。

分析波长光束组合效率不是很高的原因,主要有以下 4 个方面:(1)外腔镜高的反射率。为了最大程度抑制子腔对锁定的影响,实现整个 LDA 的锁定,我们选定的外腔镜反射率为 30%,高的发射率对输出功率有较大的影响,如果能在二极管阵列输出端面镀减反膜,采用较低反射率的外腔,组合效率会有较大程度的提高;(2)光栅的衍射损耗。光栅的衍射损耗主要是由于出射光束的偏振方向与光栅不匹配造成的,实验中 LDA 出射 TE 偏振光,实际测量发现沿 1 级的衍射效率约为 70%,对比光栅供应商提供的衍射曲线参数:808 nm 附近 TE 方向偏振光束的衍射效率约为 90%,由于两者可能不是最佳匹配,由此有很大一部分能量被损耗。同时第 0 级方向衍射发现约为 5%的光束被损耗掉;(3)smile 效应的影响。实验发现,快轴方向上 smile 效应对光束质量的影响比较大。一般来说快轴光束质量因子大致以 $M_y^2\eta/F$ 增加^[19],其中: M_y^2 为阵列快轴上的光束质量因子; $\eta < 1$ 时,存在 smile 效应的影响,无 smile 效应时 $\eta = 1$;smile 效应越明显,快轴光束质量越差; F 为填充因子。实验采用阵列发光单元宽度为 100 μm ,阵列周期为 500 μm ,因此其填充因子 $F=0.2$ 。由于光束组合是对 LDA 单元沿慢轴方向(沿 x 方向)的出射光实现光束组合,而 LDA 快轴方向上(沿 y 方向)的 smile 效应不可避免,所以在实验中可适当放宽快轴的准直,这样有利于减小 smile 效应对反馈光的影响,有利于各单元被外腔锁定,实现阵列光束组合;(4)柱透镜自身的反射、吸收及衍射损失影响较大。因此实验中我们需要采用镀多层 808 nm 附近宽带增透膜来提高镜片光束透光率,减少损耗。

我们对波长光束组合组合系统的稳定性进行了测试。借助组合锁定输出频谱情况,我们在注入电流为 60.6 A 时,分别测定了第 5 s 和第 25 s 的 LDA 输出光谱的锁定情况,如图 9 所示。由图 9,我们发现波长组合系统锁定后输出光谱比较稳定,即整个 LDA 锁定光谱上下略有波动,左右没有发生偏移。

4 结 论

本文基于多波长光束组合技术,采用 1 cm 的标准二极管激光阵列,将 LDA 的各个发光单元锁定在不同的



Fig. 7 Output beam spot of WBC after coupling mirror with injection current of 60.6 A

图 7 注入电流为 60.6 A 时光束通过部分耦合镜后聚焦输出光斑

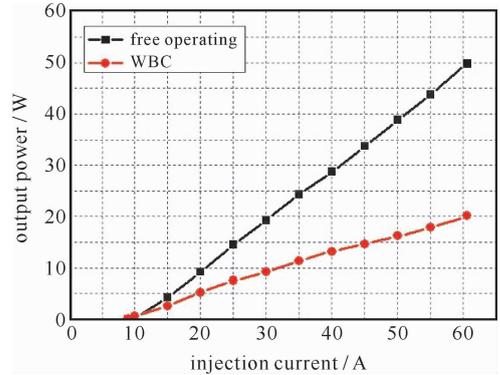


Fig. 8 Output power vs injection current of WBC at incident angle of 54°

图 8 入射角为 54° 时,注入电流与输出功率的关系

波长上,以近似平行的光束沿光栅的-1级衍射方向出射。在注入电流为 60.6 A,激光二极管阵列自由运转情况下,输出功率为 49.8 W 时,获得了功率为 20.1 W 的近平行光束组合输出,组合效率为 40.36%,远场聚焦光斑图样呈近圆形光斑分布,对应远场发散角为 1.66 mrad,组合后光谱展宽约为 15 nm,改善后的光束质量因子 $M_{x,y}^2$ 约为 32。与相干光束耦合相比较,其 LDA 各个单元可以独立调节,不需对其波长、相位、偏振态以及振幅进行控制,从而可实现非相干的功率定标放大。此外,波长光束组合的光强分布不随组合单元数目而改变,且在远场和近场均能保持较好的叠加,可以获得远高于 LD 激光器输出功率的激光束,并保持良好的光束质量,从而可克服将单个 LDA 定标到更高亮度的困难。因此,光束组合技术将成为当今强激光技术领域中具有独特应用前景且富于挑战性的课题。

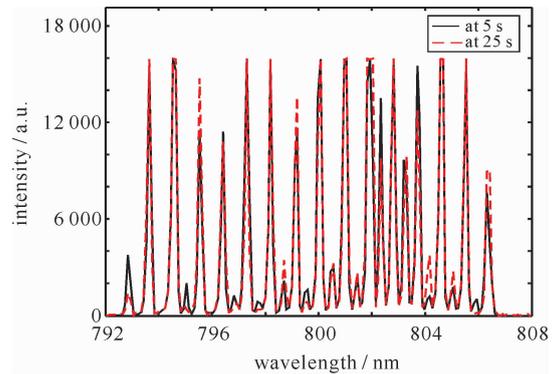


Fig. 9 Output spectra of WBC locked at $f=200$ mm with injection current of 60.6 A

图 9 注入电流为 60.6 A 时波长光束组合锁定输出光谱

参考文献:

- [1] Bachmann F. Industrial application of high power diode lasers in materials processing[J]. *Applied Surface Science*, 2003, **208-209**:125-136.
- [2] Clarkson W A, Hanna D C. Two-mirror beam-shaping technique for high power diode bars[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**(6):375-377.
- [3] Du K, Baumann M, Ehlers B, et al. Fiber-coupling technique with micro step-mirrors for high-power diode laser bars[C]//Advanced Solid State Lasers. 1997:390-393.
- [4] Zhao Pengfei, Li Qiang, Guo Weirong, et al. In-phase output beam from broad-area diode array using Talbot cavity[J]. *Chin Opt Lett*, 2007, **5**(5):284-285.
- [5] Li Qiang, Zhao Pengfei, Guo Weirong. Amplitude compensation of a diode laser array phase locked with a Talbot cavity[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**:231120.
- [6] 王克俊,李强,郭渭荣,等. 二极管激光阵列在 Talbot 外腔中同向模的选择[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(2):177-180. (Wang Kejun, Li Qiang, Guo Weirong, et al. In-phase mode selection of diode laser array in external Talbot cavity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2):177-180)
- [7] 赵鹏飞,郭渭荣,李强. Talbot 外腔锁相相位补偿元件的理论计算[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(1):19-22. (Zhao Pengfei, Guo Weirong, Li Qiang. Phase compensation of Talbot cavity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1): 19-22)
- [8] Li Qiang, Zhao Pengfei, Guo Weirong, et al. The in-phase mode selection of a high-power diode laser array by a Talbot cavity with an amplitude compensator[J]. *Opt Commun*, 2007, **270**(2):323-326.
- [9] Cook C C, Fan T Y. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity[C]//Advanced Solid State Lasers. 1999:163-166.
- [10] Daneu V, Sanchez A, Fan J Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(6):405-407.
- [11] Chann B, Huang R K, Missaggia L J, et al. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam combining[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**(16):2104-2106.
- [12] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, et al. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(4):209-211.
- [13] Hamilton C E, Tidwell S C, Meekhof D, et al. High power laser source with spectrally beam combined diode laser bars[C]//Proc of SPIE. 2004, **5336**:1-10.
- [14] Salet P, Lucas-Leclin G, Roger G, et al. Spectral beam combining of a single-mode 980 nm laser array for pumping of erbium-doped fiber amplifier[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(4):738-740.
- [15] Jechow A, Raab V, Menzel R, et al. High CW power using an external cavity for spectral beam combining of diode laser-bar emission[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(15):3545-3547.
- [16] Jensen O B, Thestrup B, Andersen P E, et al. Near-diffraction-limited segmented broad area diode laser based on off-axis spectral beam combining[J]. *Appl Phys B*, 2006, **83**(2):225-228.
- [17] Bachmann F G. Chances and limitations of high power diode lasers[C]//Proc of SPIE. 2004, **5336**:95-105.
- [18] Lassila E, Herzberg R. Bright diode laser light source[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(15):3548-3552.

- [19] Chann B, Goyal A K, Fan T Y, et al. Efficient, high-brightness wavelength-beam-combined commercial off-the-shelf diode stacks achieved by use of a wavelength-chirped volume Bragg grating[J]. *Opt Lett*, 2006, **31**(9):1253-1255.

Wavelength beam combining of laser diode array to get 20 W CW circle spot emission

Liu Bo, Li Qiang, Zhang Xue, Hui Yongling, Han Junting, Jiang Menghua, Pang Kai
(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Based on wavelength beam combining, we use grating diffraction and external cavity feedback to lock all elements of the laser diode array(LDA) in different wavelengths, and the neighboring emitters have slight difference in locked wavelength. The output beam from the external cavity coupler mirror is nearly parallel with the same beam quality as single element of the LDA, and its brightness grows with the element number of the LDA increasing. The 1 cm linear array used in the experiment consists of 19 wide-aperture diodes with diode width of 100 μm and a fill factor is 0.2. When the free operating output power is 49.8 W and the maximal injection current is 60.6 A, the combined beam power is 20.1 W, the wavelength spread is about 15 nm, and the far field divergence angle varies from 70 mrad in free operating to 1.66 mrad in fast and slow axes in a single cavity. The corresponding beam quality factor is 32, which is the same as that of single element.

Key words: laser diode array; spectral beam combining; wavelength beam combining; diffraction grating