

文章编号: 1001-4322(2008)07-1057-06

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*

刘 波, 张 雪, 韩军婷, 惠勇凌, 姜梦华, 李 强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘 要: 采用波长啁啾体布拉格光栅外腔, 利用多波长光束组合技术成功实现了由 49 个发光单元构成、阵列发光单元宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 、填充因子为 0.5 的标准 1 cm 阵列的输出光的光束组合连续工作时, 实验获得组合输出光束平均功率为 11.2 W 的近圆形光斑输出, 其快慢轴方向光束质量平方因子约为 6, 最大工作电流对应的组合效率约为 30%。通过进一步实验验证其最大工作电流时组合效率可达 64%, 并对其技术优势和应用前景做了讨论。

关键词: 波长啁啾体布拉格光栅; 二极管激光阵列; 多波长光束组合; 衍射光栅

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A

二极管激光阵列(DLA)以其体积小、效率高、成本低、寿命长等优点在材料加工、医疗、泵浦固体激光器和光纤激光器等领域有着越来越广泛的应用。目前商用 DLA 输出光束在快轴方向的发散角一般为 $35^\circ\sim 40^\circ$, 在慢轴方向的发散角一般为 $6^\circ\sim 8^\circ$, 自由运转时的光谱峰值半宽为 $2\sim 4\ \text{nm}$ 。这些固有的缺陷限制了大功率 DLA 在实际中的高效率应用。DLA 在快轴方向上采用柱透镜准直, 其光束发散角能达到几 mrad, 对应的光束参量乘积(BPP)小于 $1\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$, 具有良好的光束质量。而在 DLA 的慢轴方向, 其 BPP 值很大, 为 $1\ 050\sim 1\ 400\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ ^[1], 因此 DLA 在慢轴方向的光束质量很差。目前在工业加工领域, 大功率 DLA 输出光束经聚焦后形成的光斑亮度还很低, 一般只用于塑料、橡胶等非金属的熔焊及切割、金属的表面改性及熔覆等对功率密度要求不高的场合, 而在金属的深熔焊、切割、打孔等对功率密度要求较高的场合则所占比例较小^[2]。通过改善大功率 DLA 输出光的光束质量, 获得高亮度的输出光束, 耦合进小芯径光纤直接作为系统光源, 必将大大拓展 DLA 的应用范围。

目前改善大功率 DLA 的方法主要有相干组合和非相干组合两类方法^[3-4]。相干组合又称阵列锁相, 能有效地改善 DLA 输出光的光束质量。但这种技术要求阵列各个发光单元以相同的光谱运行, 并且还需控制单元间相位的关系以产生一个有益的干涉, 因而对环境温度和仪器的精度要求极高, 且不容易获得大功率的同相超模稳定输出^[5-8]。非相干组合包括偏振耦合^[9]、光束整形^[10-11]和波长光束组合^[12-15]等, 偏振耦合技术虽然没有相位的要求, 通过在发光面积不变的情况下可提高输出功率达到改善光束质量的目的, 但不能获得近衍射极限的输出光束, 且装置结构限制了系统功率的进一步增加。光束整形技术依靠均衡快慢轴的光束质量来改善 DLA 的光束质量, 也不能获得近衍射极限的输出光束; 这两者对 DLA 的光束质量改善非常有限。而波长光束组合(WBC), 又称为光谱光束组合(SBC)是近年来国外发展起来的一种类似光通信波分复用的技术, 相比外腔锁相技术, 可以有效改善 DLA 的光谱特性, 获得近衍射极限的输出光束, 且不需要精确控制各个阵列单元的波长、振幅、相位和偏振态, 优势体现在对环境温度和仪器装置的要求均不高。此外当阵列单元数目增加时, 波长光束组合系统功率上降低更少且光学系统不需要做较大的变化, 易实现大功率稳定输出^[16-17]。通常的波长光束组合采用普通反射率为 $10\%\sim 50\%$ 的平面反射镜为耦合输出外腔, 且放置的位置距阵列较远, 整个装置很不紧凑, 稳定性很差。为使系统更加紧凑, 本文采用在快轴准直透镜后直接加波长啁啾体布拉格光栅(VBG)外腔, 先对 49 个发光单元构成的标准 1 cm Bar 条实现锁定, 再借助光栅的衍射作用实现光束组合, 连续运转时获得平均功率为 11.2 W 的近圆形光斑输出。最大电流时的组合效率约为 30%。进一步实验表明, 最大注入电流时, 系统的组合转化效率可达 64%。

* 收稿日期: 2007-10-23; 修订日期: 2008-03-24

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, 从事半导体激光器系统技术研究; sarliubo@hotmail.com。

1 原理分析

1.1 注入锁定

波长光束组合是采用一个色散元件和一个外腔,让阵列发光单元分别锁定在不同的波长上,利用色散元件的分光特性将阵列发出的光以近似平行的光束沿某一方向发射出来,其基本思想是将阵列多个单元的出射光与中心发光单元的出射光相重叠,使整个阵列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。实现波长光束组合必须使阵列各个发光单元运转在不同的波长上,相邻单元出射中心波长顺次相差 $\Delta\lambda$ 。可以采用波长啁啾 VBG 作为 DLA 的外腔来控制阵列单元的出射波长。如图 1 所示,波长啁啾 VBG 是在 PTR 玻璃^[18]基底上采用紫外光体全息的方法制作的,在横向上对波长的啁啾作用范围是 1.5 nm/mm,对波长 808 nm 附近的光束反射率为 15%,注入锁定后单元的光谱宽度约 0.2 nm。将这样的元件置于 DLA 快轴准直透镜后将与阵列单元后端面构成谐振腔,由于不同单元对应波长啁啾 VBG 上的不同部位,因而外腔注入锁定后各个发光单元具有不同的波长,其中心波长和光谱宽度由波长啁啾 VBG 决定。阵列中心单元的中心波长是 808 nm,相邻单元的中心波长依次差 $\Delta\lambda=0.3$ nm,各个发光单元出射光的光谱宽度约为 0.2 nm。锁定后整个光谱展宽为 15 nm。

1.2 波长光束组合

波长啁啾 VBG 外腔锁定使得阵列各个发光单元稳定运转在沿 Bar 条线性微小变化的不同波长上,此时采用一个分光元件可实现 WBC。WBC 的工作原理^[15]如图 2 所示。各个发光单元出射的光束以不同的波长、不同的角度(由于光栅到阵列的距离远大于阵列横向限度,所以相邻单元对光栅的入射角差别很小)入射到衍射光栅上,最后光栅将以近似平行的光束将阵列不同单元的出射光沿某一方向衍射出来,即所有的单元衍射输出的光束具有相同的出射角。

实现光束组合中,衍射光栅是一个关键的元件,需满足几个条件:

(1) 合适的 Littrow 角为

$$2\alpha\sin\theta_L = k\lambda \quad (1)$$

式中: α 为光栅周期; k 为对应的衍射级, $k=\pm 1,2,3\cdots$ (这里取 $k=1$)。

(2) 高的分辨本领,光栅的角色散率为

$$\frac{d\alpha}{d\lambda} = \frac{1}{\alpha\cos\alpha_0} \quad (2)$$

式中: α_0 是相对于光栅法线的入射角,当 $\alpha_0 = \theta_L$ 时对应的公式可写成

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\lambda}{\alpha\cos\theta_L} \quad (3)$$

式中: θ_L 为第一级的 Littrow 角; $\Delta\lambda$ 对应于 λ_n 到 λ_1 的波长变化; $\Delta\theta$ 为相应于光栅法线对应的入射角角度变化值。

(3) 高的衍射效率,匹配出射光的偏振方向在 1 级的衍射效率不小于 90%。

要实现从阵列中发出的光束在衍射光栅上叠加,在传输的过程中必须采用正透镜实现慢轴方向光束的方向转化,利用透镜焦平面上激光光束的反演特性,使不同角度入射到不同波长的光束组合为一个单一光束。这里,要实现组合第 i 个发光单元的中心波长需满足

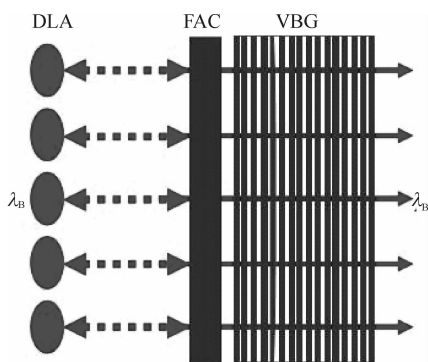


Fig. 1 Wavelength stabilization through a feedback element

图 1 采用一个反馈单元实现波长的稳定

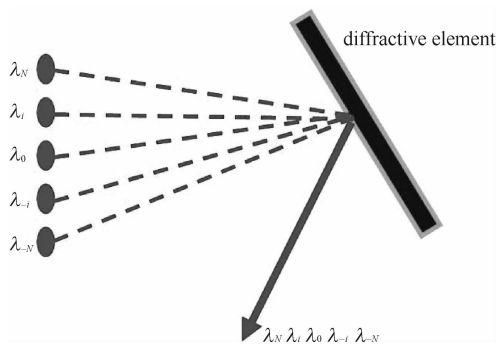


Fig. 2 Concept of slow axis beam combination with diffractive element

图 2 采用一个衍射单元实现慢轴上光束组合的原理

$$\lambda_i = \alpha(\sin\alpha_i + \sin\beta) \quad (4)$$

式中: α_i 为第 i 个发光单元入射到光栅上与光栅法线的入射角; β 为所有发光单元共同的出射角(衍射角), 这里为 β_1 。此时系统正常工作 Bar 条宽度与波长展宽 $\Delta\lambda$ ^[12] 的关系为

$$d = f\Delta\lambda \frac{d\alpha}{d\lambda} \quad (5)$$

式中: f 为转化透镜焦距; d 为阵列单元的总宽度; $d\alpha/d\lambda$ 为光栅角色散率; $\Delta\lambda$ 为总的光谱展宽(即 VBG 啁啾的波长范围)。

将式(2)代入式(5)后可得系统正常工作时对应的参数关系为

$$d = f \frac{\Delta\lambda}{\alpha \cos\alpha_0} \quad (6)$$

2 实验装置

图 3 是 WBC 的实验装置示意图。DLA 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 DLA 芯片是 nLIGHT 公司制造, 由 49 个发光单元构成, 单元宽度是 $100 \mu\text{m}$, 相邻单元中心间的距离是 $200 \mu\text{m}$, 中心波长是 808 nm , 采用实验室设计的三明治封装结构来减小阵列的“smile”效应(专利号: 200420092969. 8), 阵列的后端面镀高反膜, 前端面镀减反膜(小于 1%)以消除子腔造成的不利影响。快轴准直透镜(FAC)是 LIMO 公司制造的焦距为 $91 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.8 的微透镜, 表面镀对波长 808 nm 透过率为 99% 的增透膜。波长啁啾 VBG 的波长啁啾为 1.5 nm/mm , 频谱宽度小于 0.4 nm , 对 808 nm 波长附近的光束反射率为 15%, 距离 FAC 约 0.5 mm 。转化透镜的焦距 $f = 150 \text{ mm}$, 镀有宽带增透膜。VBG 后面插入了一个对 800 nm 左右光实现偏转的半波片, 以增加后面衍射光栅对半导体输出偏振光的衍射效率。衍射光栅是一个以微晶玻璃为基底材料、周期为 2000 lines/mm 的镀金全息光栅, 光栅的一级衍射效率大于 90%。根据方程(1)衍射效率最高处的对应波长 808 nm 计算出光栅对应的 Littrow 角为 53.9° , 实验中由于机械结构设计上的限制, 我们选择了 63° 进行实验。中心波长 808 nm 处对应的一级衍射角为 46.878° , 中心波长附近各自的不同入射角度和锁定波长之间的关系如图 4 所示。

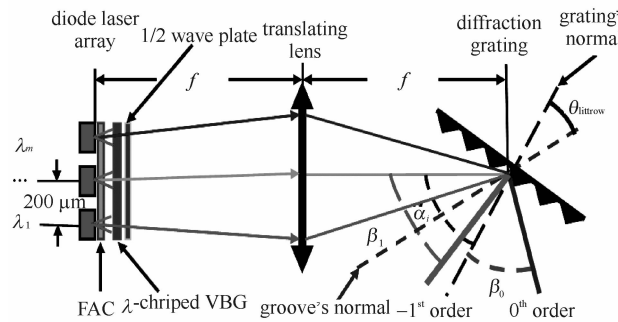


Fig. 3 Basic architecture for WBC of a diode array by using a wavelength-chirped VBG

图 3 采用波长啁啾体布拉格光栅的二极管阵列的 WBC 的基本结构

3 实验结果及分析

图 4 给出了整个阵列中 49 个单元被 VBG 外腔锁定时, 与位置(电流 $I = 35 \text{ A}$)相对应的波长锁定情况。图 4 中横坐标表示波长, 而纵坐标表示沿激光 Bar 条方向上不同位置各个单元对应的入射角度值(其大小在 Littrow 角 53.9° 附近)。每一个点的图像对应着阵列中相应的宽区发光单元。可以看出阵列中, 每一个发光单元将以 VBG 锁定后的唯一波长激发出来, 这一波长由 VBG 的工作范围决定。实验中我们采用的 VBG 啁啾的范围为 1.5 nm/mm , 对应 DLA 总的波长展宽为 15 nm 。图 5 给出了实际锁定时($I = 35 \text{ A}$), DLA 在 35 A 对应位置的近场光斑图像, 从图像中可以清晰看见 49 个发光单元锁定情况。与模拟锁定的情况完全相同。

DLA 在 40 A 自由运转时的光谱和远场光强分布如图 6 所示。光谱宽度大约为 3.95 nm , 远场光强分布为条形, 一组典型的参数为: Bar 条由 49 个单管半导体激光器组成, 每个单管的长度为 $100 \mu\text{m}$, 相邻单管之间的距离为 $200 \mu\text{m}$ 。激光在快轴方向上的发散角为 36° , 慢轴方向上的发散角为 10° 。慢轴方向光束质量因子 M^2 为 $M_{\text{slow}}^2 = 49\pi\omega\theta/\lambda = 830.44$ 。

图 7 表示波长啁啾 VBG 外腔锁定时 40 A 时 DLA 的光谱和远场光强分布。从图 7(a) 给出的波长啁啾 VBG 锁定时输出光谱图, 可以看出光谱展宽, 且刚好为 15 nm , 与 VBG 啁啾的范围 15 nm 一致。光谱峰之间的间隔为 0.2 nm , 有一定的背景, 其形成原因是由于所选择 VBG 的反射带宽太宽引起, 导致了 49 个单元没能完全分辨开。测得耦合镜输出宽度约为 18 mm 的近似平行光束, 该光束通过一个焦距为 65 mm 的聚焦镜, 在

聚焦镜的焦平面处用光束质量诊断仪测得输出光斑,光斑直径约为 $40\ \mu\text{m}$,远场发散角为 $0.6\ \text{mrad}$,如图 7(b)所示。经计算外腔耦合镜输出光的光束质量因子 M^2 约为 6,与我们采用的 Bar 条中单个发光单元的光束质量大致相当。

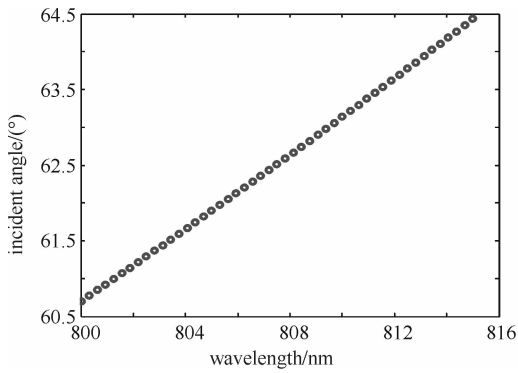


Fig. 4 Simulated wavelength of DLA's 49 locked emitters with different incident angles

图 4 激光二极管阵列对应位置(不同角度)的 49 个发光单元锁定时与对应的波长模拟图

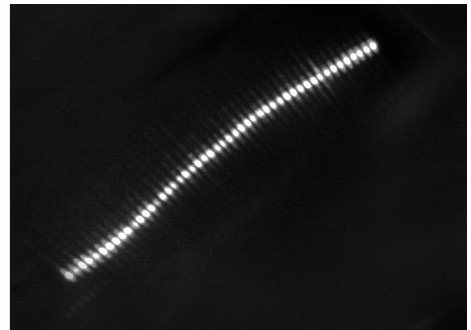


Fig. 5 Near-field-image spectrum of a DLA at 35 A current

图 5 激光二极管阵列在 35 A 对应位置的近场光斑图像

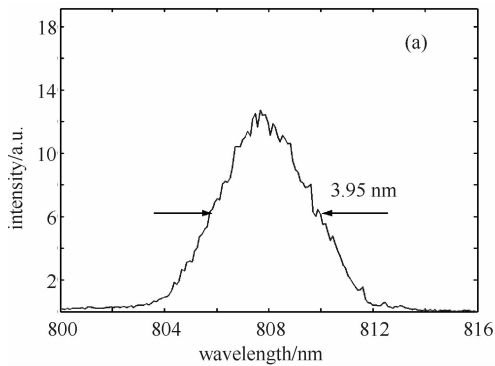
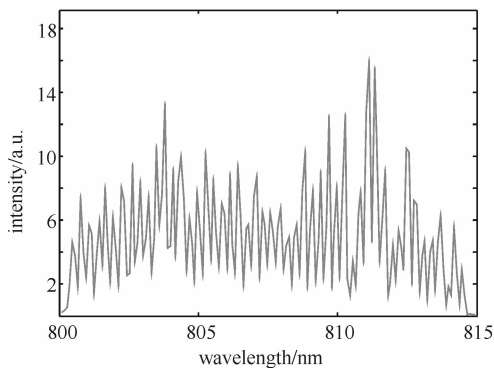
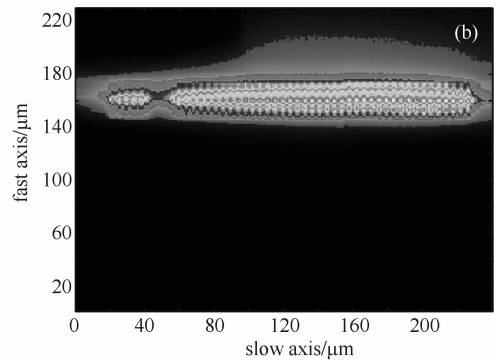
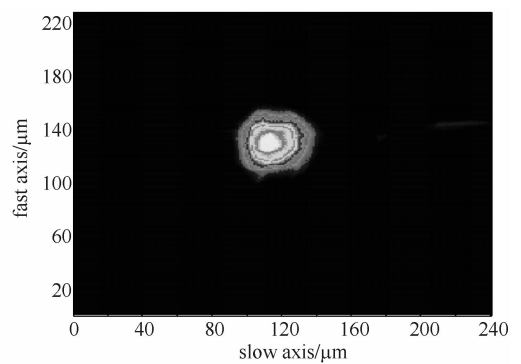


Fig. 6 Output spectrum and spot of 49 unlocked emitters in a DLA at the injection current of 40 A

图 6 注入电流 40 A 时 DLA 在自由运转时输出光谱和远场光斑



(a) output spectrum of 49 emitters locked by VBG



(b) output spot at the focal length of the lens

Fig. 7 Output spectrum and spot of 49 emitters locked by a λ -chirped VBG external cavity in a DLA at the injection current of 40 A

图 7 注入电流 40 A 时 DLA 在自由运转和波长啁啾 VBG 外腔锁定时输出光谱和远场光斑

对输出光束质量因子研究发现,快轴方向上“smile”效应的影响对其光束质量的影响比较大,一般来说,快轴方向光束质量因子大致以 $M_y^2 \eta / F^{[16]}$ 增加,这里 M_y^2 对应着阵列快轴方向上的光束质量因子, $\eta \geq 1$ 对应“smile”效应的影响,无“smile”效应时该值等于 1,填充因子 F 约为 0.5。可以看出“smile 效应”越大,其快轴光束质量会越差。慢轴方向的光束质量根据光束组合技术的基本原理,组合后慢轴方向光束质量和单个单元慢轴锁定后的光束质量大致相同。因此,组合输出光束的光束质量由组合前慢轴单个单元的光束质量决定。

图 8 描述 DLA 连续运转时的输出功率与注入电流的关系曲线。VBG 锁定后,DLA 激发阈值电流由 25 A 降至 18 A,在 55 A 时,整个阵列实现光束组合后输出功率为 11.2 W。这时对应的 WBC 系统的效率为 30%。

由于光栅实际可使用的面积太小,约 1/3 的光没能经过光栅衍射就直接损失了。我们挡住部分阵列,测量了系统的自由运转的功率、WBC 后的功率,其测试结果如图 9 所示。这里 WBC 系统的效率定义为应用波长光束组合(WBC)与自由运转即没有 VBG 的状态下输出功率测量值的比率,发现注入电流小于 48 A 时,整个系统的转化效率为 75%左右,从 48~55 A 组合效率略有下降,到最大注入电流为 55 A 时,效率约为 64%。此时观察到光栅上光宽超过了光栅的实际宽度,很显然,这是由于慢轴发散角随着注入电流增加而增大导致的。

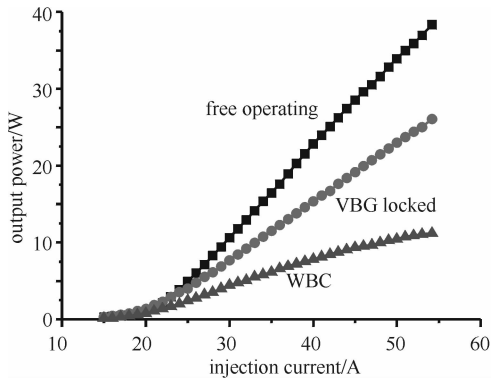


Fig. 8 Output power of DLA in free-running, locked by VBG and using wavelength-beam-combin(WBC) versus inject current

图 8 描述 DLA 在 WBC 系统和自由运转系统的输出功率与注入电流的关系曲线

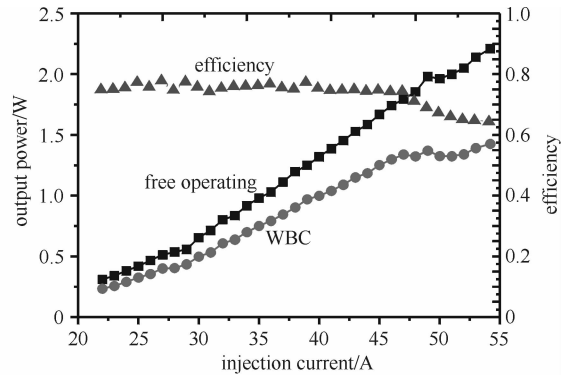


Fig. 9 Left axis, WBC and free-running output power versus current for a part DLA; Right axis, beam combining efficiency and versus current for a part DLA bar

图 9 部分激光二极管阵列在 WBC 系统和自由运转系统与电流对应的输出功率及效率

此外分析系统组合中能量损失,我们还发现:能量的损失主要发生在慢轴方向和衍射光栅上面。一方面,由于 DLA 各个单元自身慢轴发散角较大,同时可用于转化透镜的实际面积比较小,有一部分光没有准直到光栅上面就损失掉。另一方面,由于结构的限制和偏振的影响,直接导致了衍射光栅实际效率低于 80%。下一步的实验将优化实验参数,选用更小焦距的和更大面积的慢轴准直透镜来提高转化效率;或者采用微柱透镜阵列来准直激光二极管阵列慢轴光束;采用更高功率的 Bar 条、获得更高亮度的光束组合输出。

提高整个系统的性能和效率还体现在以下几方面:在阵列的前表面镀有更高的增透膜、更低的“smile”效应(小于 $1 \mu\text{m}$)、更低的 VBG 反射率(小于 10%)、更小的光栅扭曲变形。对一般前表面反射率(小于 1%)激光二极管阵列来说,最佳的 VBG 反射率为实验方法验证为 10%^[12],我们可以设想,如果二极管阵列子腔内的出光面镀膜的透过率越高,透射式 VBG 反射率可以更低,将对整个阵列锁定输出光的功率和光束质量均有益。通过缩放系统比例达到更高的功率包括增加 Bar 条或采用多 Bar 条的堆,就我们采用的 VBG,整个系统的带宽将接近 15 nm。在实际应用中,需要光谱有更窄的带宽。这就需要使用更小啁啾波长范围的 VBG。

4 结 论

本文采用啁啾体布拉格光栅外腔和波长光束组合技术相结合的方法实现二极管阵列光束质量的改善,为实现整个 Bar 锁定组合实现单根小芯径光纤耦合提供了条件,展现了其改善半导体激光器输出光束质量并作为光源直接运用的巨大潜力。实验采用线形波长啁啾 VBG 将一波长为 808 nm、发光单元宽度为 $100 \mu\text{m}$ 、填充因子为 0.5 的宽区连续工作的激光二极管阵列的 49 个单元锁定在沿 Bar 条方向线形变化的不同波长上、然后采用衍射光学元件的波长光束组合技术实现了 49 个单元输出光束的组合。测量获得 11.2 W 的平均功率,对应于最大电流时整个系统的波长组合效率约为 30%,并通过实验改进测得其最大电流时,其组合效率可达到 64%。实验证明:采用波长啁啾 VBG 外腔和波长光束组合技术相结合,与采用部分反射平面镜外腔的光束组合技术^[15]相比,整个结构更加紧凑,便于系统集成,具有效率更高的优势,如果采用更大功率的 Bar、2 维 Bar 条或堆,并将其直接耦合进小芯径光纤,作为直接运用的激光加工光源。同时,实验还表明体布拉格光栅元件在精确控制中心波长和降低 Bar 条的 FWHM 带宽、实现二极管激光 Bar 条的波长稳定方面具有优势。这种采用衍射元件的波长光束组合技术将有力推动下一代高亮度、小芯径光纤耦合的半导体激光的高效运用。

参考文献:

- [1] Zhen Y J, KAN G H. Narrow-bandwidth high-brightness external-cavity laser diode bar[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2007, **46**(10): 10-13.
- [2] Bachmann F. Industrial application of high power diode lasers in materials processing[J]. *Appl Sur Sci*, 2003; **208**: 125-136.
- [3] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2005, **11**(3): 567-577.
- [4] Fan T Y, Sanchez A. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared[C]//Proc of SPIE. 2004, **5709**: 157-164.
- [5] 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 K J, Li Q, Guo W R, 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)
- [6] Li Q, Zhao P F, Guo W R. Amplitude compensation of a diode laser array phase locked with a Talbot cavity[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**: 231120.
- [7] Zhao P F, Li Q, Guo W R, et al. In-phase output beam from broad-area diode array using Talbot cavity[J]. *Chin Opt Lett*, 2007, **5**(5): 284-285.
- [8] Li Q, Zhao P F, Guo W R, 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**: 323-326.
- [9] Bachmann F G. Chances and limitations of high power diode lasers[C]//Proc of SPIE. 2004, **5336**: 95-105.
- [10] Clarkson W, Hanna D C. Two mirror beam-shaping technique for high power diode bars[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**: 375-377.
- [11] Du K, Baumann M, Ehlers B, et al. Fiber-coupling technique with micro step-mirrors for high-power diode laser bars[J]. *Advanced Solid State Lasers*, 1997, **10**: 390-393.
- [12] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, et al. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**: 405-407.
- [13] 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**: 2104-2106.
- [14] Huang R K, Chann B, Missaggia L J, et al. High-brightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, **19**(4): 209-211.
- [15] 刘波, 张雪, 赵鹏飞, 等. 多波长光束组合改善二极管激光阵列的光束质量[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(12): 1951-1954. (Liu B, Zhang X, Zhao P F, et al. Improving beam quality of diode laser array by wavelength beam combining. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(12): 1951-1954)
- [16] Chann B, Goyal A K, Fan T Y. 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**: 1253-1255.
- [17] Roh S D, Grasso D M, Ostrom N P. High-brightness fiber coupled diode laser systems[C]//Proc of SPIE. 2007, **64560P**.
- [18] Ciapurin I V, Glebov L B, Smirnov V I. Optical modeling of phase volume diffractive gratings, part 1: transmitting sinusoidal uniform gratings[J]. *Engineering*, 2006, **45**: 015802.

Wavelength beam combining of laser diode array by wavelength-chirped volume Bragg grating external cavity

LIU Bo, ZHANG Xue, HAN Jun-ting, HUI Yong-ling, JIANG Meng-hua, LI Qiang
(1. College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: With an external cavity containing a wavelength-chirped volume Bragg grating, multi-wavelength beam combining is realized with a standard bar of 49 emitters. The width of the emitter is 100 μm , and the fill factor is 0.5. Beam quality factor of 6 for both the fast axis and the slow axis is achieved at CW operating, and a nearly round output spot of high intensity with a peak power of 11.2 W is gotten. The efficiency at the maximum operating current is about 30%. An efficiency of 64% at maximum working current is proven in a more detailed experimental study. The technical advantages and possible applications are discussed.

Key words: Wavelength-chirped volume bragg grating; Diode laser array; Wavelength beam combining; Diffraction grating