

文章编号: 1001-3806(2010)01-0138-03

二极管激光光谱合束技术实验研究

于 益, 王卫民, 鲁燕华, 谢 刚, 彭跃峰

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究基于光栅-外腔的二极管激光阵列光谱合束, 利用存在离轴像差情况下耦合效率模型, 数值模拟了系统各参量对耦合效率的影响, 可知耦合效率随着离轴距离和横模阶次增加而下降; 单个单元将被压窄至 0.05nm。应用光栅-外腔实现了单条二极管激光阵列光谱合束, 获得了 10.1W 的连续输出, 斜效率为 0.45W/A, 慢轴方向光束质量因子 $M_x^2 = 17.6$, 整个阵列的光谱被展宽到 15nm, 单个单元的线宽被压窄到 0.1nm。结果表明, 光谱合束能改善二极管激光阵列的光束质量, 压窄单个单元的线宽。

关键词: 激光技术; 非相干合束; 光谱合束; 光栅-外腔; 二极管激光

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.0138

Experimental research of spectrally beam combined diode laser based on grating-cavity

YU Yi, WANG Wei-min, LU Yan-hua, XIE Gang, PENG Yue-feng

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to study spectral beam combining of a laser diode array (LDA) based on grating-cavity, coupling efficiency model with abaxial aberration was adopted to analyze the effect of the system parameters on the coupling efficiency. The coupling efficiency decreased when abaxial distance or the order of mode increased, and the linewidth of emitters could be compressed to 0.05nm. A LDA comprised of 19 emitters was spectrally combined by means of grating-cavity with 10.1W CW output power, 0.45W/A slope efficiency and beam quality factor M_x^2 of 17.6 along the slow axis. Spectrum width of the LDA was broaden to 15nm, and linewidth of a single emitter was compressed to 0.1nm. It is shown that spectral beam combining can improve beam quality of a LDA and narrow linewidth of emitters.

Key words: laser technique; incoherent beam combining; spectral beam combining; grating-cavity; diode laser

引言

大功率二极管激光阵列 (laser diode array, LDA) 具有电光转换效率高、体积小、功率大、可靠性高、结构简单, 可制成小体积全固化器件等优点, 因而在激光照明、抽运固体激光器或光纤激光器、材料处理、医药、航空航天等领域有着广阔的应用前景。然而 LDA 慢轴方向为多模高斯分布, 光束质量极差 ($M_x^2 \geq 2000$)^[1], 这限制了它的进一步应用。光栅外腔光谱合束对一条或多条 LDA 应用光栅-外腔将各单元激光在远场叠加, 可获得高功率、高亮度激光输出。自 1999 年麻省理工大学 Lincoln 实验室实现 11 个单元宽区 LDA 的

合束以来^[2], 光谱合束已成为新的研究热点^[3-9]。作者利用光栅-外腔实现了单条 LDA 的光谱合成, 获得 10.1W 连续输出, 慢轴方向光束质量因子 $M_x^2 = 17.6$ 。

1 实验装置

图 1 是实验装置示意图。实验装置由 LDA、快轴

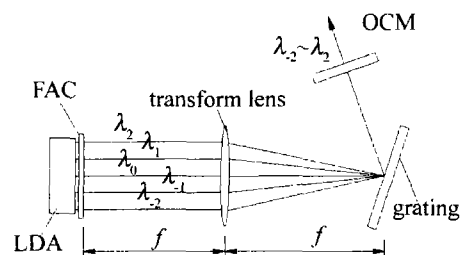


Fig. 1 Schematic diagram of spectral beam combining apparatus based on grating cavity

准直镜 (fast axis collimation, FAC)、变换透镜、光栅、耦合输出镜 (output coupling mirror, OCM) 构成。光栅将不同位置的阵列单元锁定在不同波长, 并将不同波长的激光束合束; 光栅和二极管激光器阵列均置于变换

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助项目 (20060430)

作者简介: 于 益 (1977-), 男, 研究实习员, 硕士, 现从事二极管抽运固体激光器研究。

E-mail: smart_leo@163.com

收稿日期: 2008-11-25; 收到修改稿日期: 2009-01-19

透镜的焦平面上,变换透镜将不同位置的阵列单元发射的光束以不同角度投射在光栅面上,同时确保各光束在光栅面上重叠;耦合输出镜垂直于衍射光栅的1级衍射方向,与LDA的后端面形成谐振腔。这样,通过耦合输出镜出射的光束是LDA各个单元出射光束的叠加,整个LDA光谱合束的光束与单个单元出射光束有近似的光束质量。

实验用LDA芯片由中电集团13所制造,由19个发光单元组成,单元宽度 $150\mu\text{m}$,相邻单元中心距 $500\mu\text{m}$,中心波长 800nm ,芯片前端面镀增透膜以消除内腔的不利影响,其中LDA由中国工程物理研究院应用电子学研究所自行封装。透镜为焦距为 35cm 双球面聚焦透镜,光栅刻线密度为 1480g/mm ,闪耀波长为 800nm ,1级衍射效率约为 85% ,入射角 $\alpha_0 = 20^\circ$,耦合输出镜OCM反射率为 10% 。测试仪器包括光谱仪、功率计、光束质量测试仪。

合束装置输出激光的光谱宽度 $\Delta\lambda$ 和光栅色散率 $\frac{d\alpha}{d\lambda}$,变换透镜焦距 f 、阵列长度 d 相关:

$$\Delta\lambda = d / \left(f \frac{d\alpha}{d\lambda} \right) \quad (1)$$

光栅色散率由下式决定:

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

式中, m 为衍射级次, p 为光栅常数。

由(1)式、(2)式和试验装置中器材的参量可知,LDA光谱合束后阵列光谱宽度为 18.1nm 。

光栅-外腔光谱合成的效率主要由激光器和外腔的耦合效率决定,耦合效率定义如下:

$$J = \iint E_{in}^*(x,y,\lambda) E_{out}(x,y,\lambda) dx dy \quad (3)$$

式中, $E_{in}(x,y,\lambda)$ 为激光器出射光场, $E_{out}(x,y,\lambda)$ 为反馈光场,二极管激光阵列各单元的光场用厄米-高斯模 $TEM_{m,0}$ 来描述:

$$E(x,y) = H_m \left(\frac{\sqrt{2}}{w_x} x \right) \exp \left(-\frac{x^2}{w_x^2} - \frac{y^2}{w_y^2} \right) \quad (4)$$

假设模场半径(慢轴方向) $w_x = 20\mu\text{m}$,模场半径(快轴方向) $w_y = 0.15\text{mm}$ 。利用文献[8]中的方法,得到耦合效率随离轴距离的变化情况(见图2)。由图2可知,耦合效率随着离轴距离的增大而降低,这是因为随着离轴距离增加,像差增大,反馈光场和原光场相似程度降低,耦合效率下降。当离轴距离为 5mm ,基模耦合效率约为 90% ,故利用所选实验器件实现光谱合束是可行的。图3为耦合效率随波长偏移量的变化情况,由图3可知,当波长偏离中心波长越远,反馈光线将偏离原始位置越远,从而造成耦合效率急剧下降;

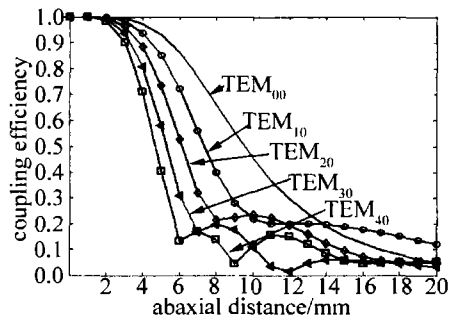


Fig. 2 Coupling efficiency vs. abaxial distance

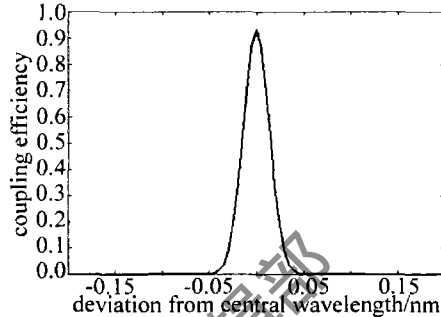


Fig. 3 Coupling efficiency vs. wavelength deviation

经过外腔反馈后,LDA的单个单元线宽将被压窄到 0.05nm (半峰全宽)。

2 实验结果与讨论

图4为前腔面镀 5% 反射膜的标准LDA自由运转,注入电流为 30A 时测的光谱,其线宽(半峰全宽)

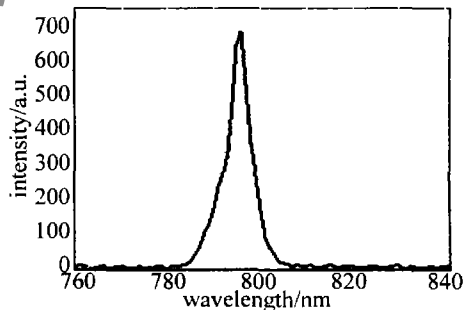


Fig. 4 Spectrum of free running LDA

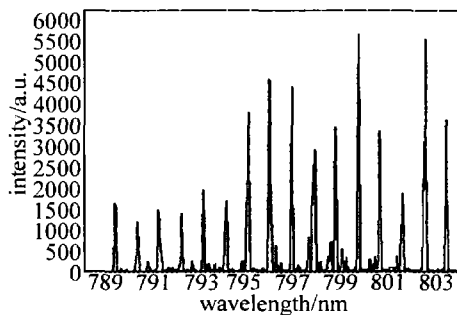


Fig. 5 Spectrum of spectrally beam combined LDA

约为 4nm 。图5为LDA光谱合束后的输出光谱,整个阵列光谱由16个尖峰组成,相邻单元中心波长相距约 1nm ,整个阵列的光谱宽度被展宽至 15nm 。理论上整个阵列光谱有19个尖峰,光谱宽度应为 18.1nm ,估计由于smile效应造成端面有3个单元与外腔耦合效率

过低没有起振。各单元激光的线宽则被压窄至 0.1 nm, 这和模拟结果的趋势基本相符; 单个单元线宽为模拟结果的两倍, 估计是由于光谱仪的精度偏低造成的(光谱仪的精度为 0.1 nm)。

图 6 为 LDA 功率-电流特性曲线。由图可知, 前

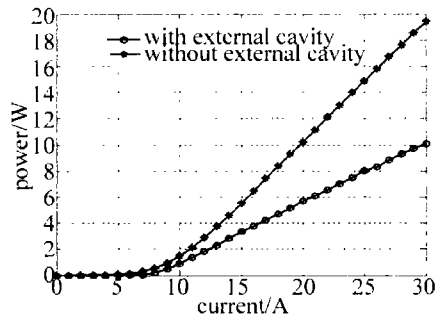


Fig. 6 Power vs. current

腔面镀 5% 反射膜的标准 LDA 自由运转时, 当注入电流为 30 A 时, 输出功率为 19.6 W, 斜效率为 0.91 W/A; 在注入电流为 30 A 时, 得到 10.1 W 连续输出, 斜效率为 0.45 W/A。光谱合束比前腔面镀 5% 反射膜自由运转的标准 LDA 的功率和斜效率小 50%, 这是因为: (1) 光栅的绝对衍射效率为 85% 左右, 往返经过光栅必然造成输出功率降低; (2) 透镜像差造成二极管激光与外腔耦合效率降低, 且耦合效率随着 LDA 发光单元离轴距离增加和光场横模阶次提高而降低, 因此, 部分高阶模无法起振而造成光谱合束的功率比自由运转时的功率偏低。

LDA 的单个单元的慢轴方向光束质量 $M_x^2 \approx 60$, 整个 LDA 的光束质量 $M_x^2 > 2000$ 。经过光栅-外腔反馈后, 部分激光单元的部分高阶模由于耦合效率过低而不能起振, 从而提高单个单元的光束质量, 光栅将各个单元的光束在空间重叠, 必然会使得整个阵列慢轴方向的



Fig. 7 Measurement result of beam quality

光束质量提高。当注入电流为 30 A 时, 整个阵列合束后慢轴方向光束质量因子 $M_x^2 = 17.6$ (见图 7), 慢轴方向光束质量相对于自由运转的 LDA 有很大提高。

3 结论

对基于光栅-外腔的二极管激光光谱合束技术进行了实验研究。在注入电流为 30 A 时, 得到了 10.1 W 连续输出, 斜效率为 0.45 W/A, 慢轴方向光束质量因子 $M_x^2 = 17.6$, 输出激光光谱展宽为 15 nm, 并呈梳状分布, 各单元激光光谱被压窄为 0.1 nm。实验结果表明: (1) 基于光栅-外腔的光谱合束技术能有效提高 LDA 的光束质量; (2) 光栅衍射损失和透镜的离轴像差是 LDA 光谱合束后相比标准 LDA 输出功率下降的主要原因。进一步试验可以采用像差更小的透镜, 以提高耦合效率和衍射效率更高的光栅来降低衍射损失, 从而提高光谱合束的功率和效率。

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] 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(6): 405-407.
- [3] LIU B, ZHANG X, ZHAO P F, et al. Improving beam quality of diode laser array by wavelength beam combining [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 1951-1954 (in Chinese).
- [4] ZHANG Y, ZHANG B, ZHU S J. Analysis of the property of the beam after spectral beam combining [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4590-4595 (in Chinese).
- [5] HUANG R K, CHAN N 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.
- [6] HAMILTON C E, TIDWELL S C, MEEKHOF D, et al. High power laser source with spectrally beam combined diode laser bars [J]. Proc SPIE, 2004, 5336: 1-10.
- [7] FAN T Y, SANCHEZ A. Coherent (phased array) and wavelength (spectral) beam combining compared [J]. Proc SPIE, 2005, 5709: 157-164.
- [8] YU Y, WANG W M, LU Y H, et al. Simulation of spectrally beam combined diode laser based on grating-cavity [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(2): 189-192 (in Chinese).
- [9] ZHOU P, HOU J, CHEN Z L, et al. Comparison for coherent combining and spectrum combining of fiber lasers [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 413-416 (in Chinese).
- [10] ZOU S X. Quantum mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 38-41 (in Chinese).
- [11] ZHOU S H. Stable resonator transverse mode-selecting techniques [J]. Laser & Infrared, 1980, 10(3): 1-9 (in Chinese).
- [12] QIU J L. The beam quality of high power lasers and its influences on the laser processing [J]. Laser Technology, 1994, 18(2): 86-91 (in Chinese).

(上接第 137 页)

- [7] ZOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, et al. Principles of lasers [M]. 5th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 49-69 (in Chinese).
- [8] GUO S H. Electrodynamics [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 140-144 (in Chinese).
- [9] CHEN J. Optical electromagnetic [M]. Beijing: Science Press, 2005: 43-46 (in Chinese).