

文章编号: 0258-7025(2007)06-0751-04

激光二极管阵列的窄线宽、可调谐输出

苏宙平^{1,2}, 楼祺洪¹, 董景星¹, 周 军¹, 魏运荣¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 外腔反馈的激光二极管阵列(LDA)可获得窄线宽、可调谐的光谱输出。外腔由快轴准直镜、准直光学系统和闪耀光栅组成。由于阵列中各发光单元的排列弯曲导致不同波长的光原路返回,引起谱线展宽,在输出光路中加入光谱滤波器,使激光二极管阵列的线宽进一步窄化。这样,激光二极管阵列的输出光谱由自由运转时的2 nm压缩到0.12 nm,在恒定温度23 ℃时,实现了激光在806~818 nm的调谐,调谐范围达12 nm。

关键词 激光技术;激光二极管阵列;外腔;窄线宽;可调谐

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Linewidth-Narrowed, Tunable Laser Diode Array

SU Zhou-ping^{1,2}, LOU Qi-hong¹, DONG Jing-xing¹, ZHOU Jun¹, WEI Yun-rong¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Linewidth-narrowed, tunable spectrum can be obtained by external cavity feedback laser diode array (LDA). The external cavity is made up of fast axis collimator, collimating optical system and diffraction grating. Due to smile effect, each beam from emitter strikes the grating at a different angle, so the spectrum of each emitter has a different center wavelength and is expanded. All the emitters spectra compose the array spectrum whose width is increased by the smile effect. A spectrum filter is placed in the output branch to further narrow the spectrum. By this, the linewidth of LDA output is reduced from 2 nm to 0.12 nm with a tuning range of 12 nm (806~818 nm).

Key words laser technique; laser diode array; external cavity; linewidth-narrowed; tunable

1 引 言

高功率激光二极管阵列(LDA)由于其价格低廉、结构紧凑、易于操作得到了广泛的应用^[1]。激光二极管阵列的典型的线宽为2~4 nm^[2]。然而,在许多应用中,均要求激光光谱具有窄线宽和大的调谐范围,例如:光学参量振荡用的抽运源^[1]、激光冷却、捕获原子^[3]、激光治疗、激光打印、激光精密测量、材料加工等^[4~7]。特别是最近医学上的一个研究热点,通过自旋交换的光学抽运(SEOP)来产生大量的超偏振的氦和氙用于磁共振(MRI)成像,要求这种光学抽运源必须产生高功率、窄线宽的激光^[2,8]。

通常用来改善激光二极管光束空间特性或光谱特性的方法主要有注入锁定^[9~11]和各种各样的外

腔反馈。这些方法主要是针对于小功率的单个激光二极管。

对激光二极管阵列应用外腔,要求阵列中每个发光单元发出的光要经过外腔反馈,沿原路返回每个发光单元。由于外腔中的光学系统存在像差以及激光二极管阵列中各发光单元排列很难保证在一条直线上,即必然存在弯曲,这些都给反馈光沿原路返回各个发光单元带来了很大难度。因此对高功率的激光二极管阵列应用外腔来改善其谱线宽度和调谐范围,在国内研究较少。

本文中,外腔是由快轴准直镜、自行设计的准直光学系统和闪耀光栅组成。光栅的1级衍射提供反馈,光栅的0级衍射作激光输出,在0级输出的光路中,再放置一个光谱滤波器,进一步窄化输出光

收稿日期:2006-10-16;收到修改稿日期:2006-12-29

作者简介:苏宙平(1978—),男,山西人,博士研究生,研究方向为半导体与光纤激光技术。E-mail:szpciomp@yahoo.com

导师简介:楼祺洪(1942—),男,研究员,博士生导师,目前研究方向为高功率光纤激光器及其应用。

E-mail:qhlou@mail.shcnc.ac.cn

谱。通过调节光栅的反馈角度,使输出的谱线波长发生变化,达到了调谐的目的。

2 实验装置及结果分析

2.1 实验装置与原理

实验中使用的激光二极管阵列长1 cm,含有46个发光单元,中心波长为808 nm,谱线宽度为2 nm。实验装置如图1所示,激光二极管阵列发出的光经快轴准直镜(FAC)进行准直(y 方向为快轴方向),准直后的光束大约有 1° 左右的发散角。快轴准直镜是一个柱面镜。经过快轴准直后的光再通过一个准直系统,该系统的前组(lens1)是一个焦距 $f_1 = 50$ mm,口径 $D_1 = 25$ mm的双胶合透镜,后组(lens2)为一个焦距 $f_2 = 200$ mm,口径 $D_2 = 50$ mm的单透镜,系统的放大倍数 $\Gamma = 4$ 。该系统的主要目的是压缩慢轴方向的发散角(约 10°)。

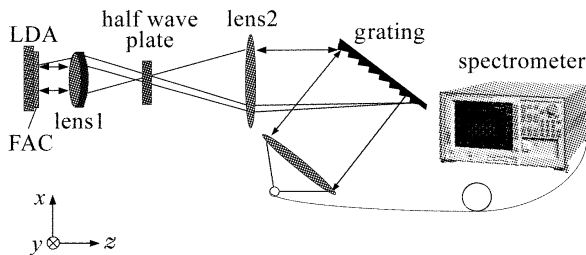


图1 实验装置图
Fig.1 Experimental setup

光束通过准直系统后,发散角压缩了4倍。通过准直系统的光束打到了一个闪耀光栅上,该光栅的栅距为1200线/mm,面积为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$,对800 nm的光闪耀。光栅的一阶衍射作为反馈,提供给增益介质,继续振荡、放大。其中,激光二极管阵列,快轴准直镜,透镜1,透镜2以及闪耀光栅构成了外腔。外腔中的光学元件均镀上了808 nm的增透膜。光栅的零阶衍射作为激光的输出,在激光的输出光路中,插入一个光谱滤波器,对输出的谱线宽度进一步压缩。输出激光通过光谱滤波器后经过一个会聚透镜会聚到光谱仪的光纤探头上。当作为反馈的一阶衍射为某个特定波长时,根据模式的竞争理论,其他波长的谱线振荡被抑制,因此输出的谱线即为该波长的谱线。根据光栅方程^[12]

$$m\lambda = d(\sin\alpha \pm \sin\beta),$$

式中 m 为光栅衍射级, λ 为波长, d 为光栅常数, α 为入射角, β 为衍射角。从光栅方程可以看出,通过调节光栅的角度,改变一阶衍射提供的反馈光的波长,

进而使输出波长发生改变,以实现调谐。由于光栅的衍射效率与光的偏振方向密切相关,外腔中插入半波片,目的是通过旋转半波片来调整光的偏振方向,从而控制光栅一阶反馈光的数量,使从光栅零阶输出的窄线宽光谱功率最大化^[8]。

2.2 外腔中的准直系统设计

外腔中的准直系统是一个倒置望远系统。由于倒置望远系统的前组焦距 $f_1 = 50$ mm,口径 $D_1 = 25$ mm的 $F^\# = 2$,视场角约 10° ;而后组焦距 $f_2 = 200$ mm,口径 $D_2 = 50$ mm的 $F^\# = 4$,视场角约 2.5° 。为了使前后两组像差大小尽量匹配,以使系统达到最优化状态,前组采用一个双胶合透镜组,而后组采用一个单透镜。用光学设计软件ZEMAX,对该系统进行设计,设计结果如图2所示^[13,14]。

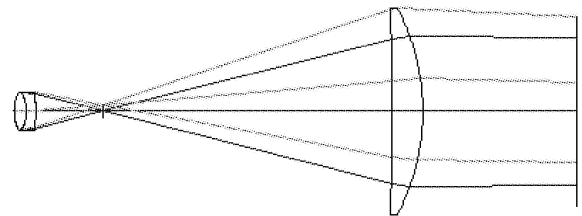


图2 准直光学系统

Fig.2 Collimating optical system

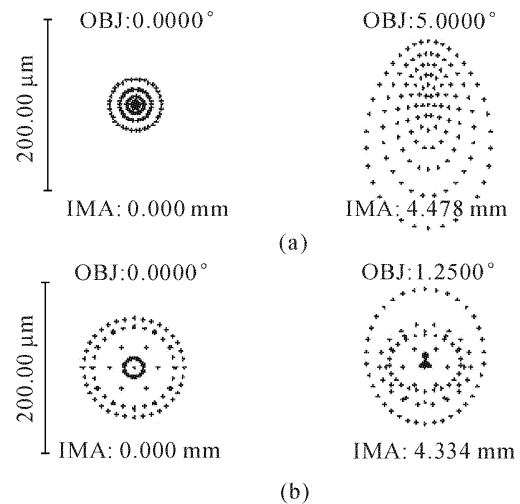


图3 前组(lens1(a))和后组(lens2(b))的点列图
Fig.3 Spot diagrams of lens1 (a) and lens2 (b)

准直系统的前后组的点列图,分别如图3(a)和(b)所示。从点列图上看,前后两组的像差大小很接近,准直系统的光学性能达到了一个比较优化的状态,能更好地达到准直的效果。

2.3 结果分析

2.3.1 激光二极管阵列的窄线宽输出

图4和图5分别为激光二极管阵列在自由运转时的激光光谱和加外腔反馈时输出的窄线宽光谱。

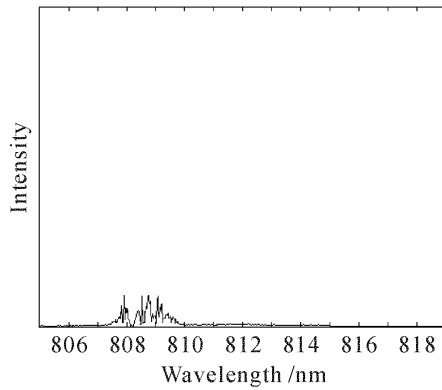


图 4 自由运转时的激光光谱

Fig. 4 Output spectrum for free running LDA

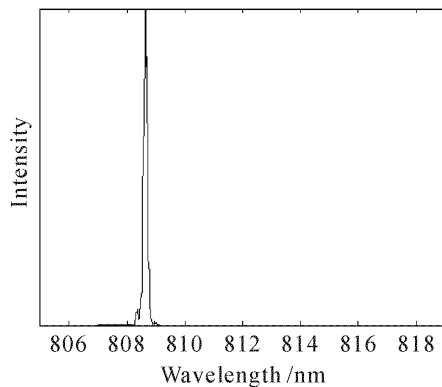


图 5 外腔反馈的窄线宽光谱输出

Fig. 5 Linewidth-narrowed spectrum for external cavity feedback LDA

从图 4,图 5 可以看出,当采用外腔反馈并在输出光路中插入光谱滤波器以后,输出的激光谱线宽度小于 0.12 nm ,与自由运转状况下的激光输出光谱(图 4)相比,谱线宽度明显变窄,窄化了大约 16 倍。窄化后的谱线,强度大幅度增强,这是由于加了外腔以后,根据模式竞争的理论,大量的振荡模式被抑制,只剩下少数的几个模式,能量都集中在少数几个模式上,因此强度得到大幅度的提升。

2.3.2 激光二极管阵列的调谐输出

通过转动外腔中的光栅,可以获得图 6 所示的调谐光谱(图 4~6 均在抽运电流 $I = 15.5\text{ A}$ 下所测)。与自由运转时的输出光谱(图 4)范围(807~810 nm)相比,调谐光谱的范围为 806~818 nm。

在整个调谐范围 806~818 nm 内,每条谱线的宽度(按半峰全宽计算)都小于 0.12 nm ,通过光栅的转动实现调谐,而温度始终保持在恒定的 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$,如果配合温度的升降,可实现更大范围的调谐。

2.3.3 讨论与分析

在自由运转情况下激光二极管阵列的功率-电流特性如图 7 所示。

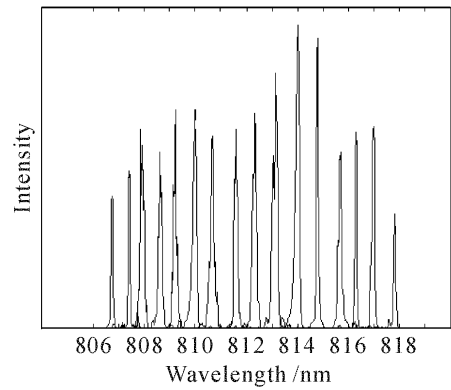


图 6 外腔反馈的窄线宽调谐光谱

Fig. 6 Tuning range and narrowed spectrum output for external cavity LDA

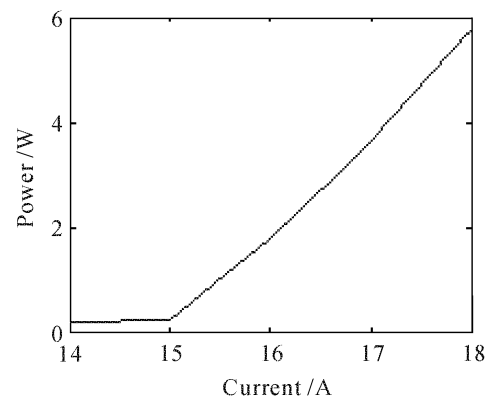


图 7 自由运转情况下激光二极管阵列的功率-电流特性

Fig. 7 Dependence of output power versus pumping current for free running diode array

在工作电流 $I = 15.5\text{ A}$,自由运转的情况下激光输出功率为 1.1 W ,加外腔反馈时,得到窄线宽输出的功率为 0.48 W 。高功率的实验最近刚刚做过,这方面的结果会在以后的文章中进行报道。谱线展宽的主要原因是由于阵列中各发光单元的排列弯曲^[15],每个发光单元发出的光以不同的角度打到光栅上,光栅沿原路反馈回来的光中心波长就不同,这就导致激光输出的谱线展宽。在输出光路中加入光谱滤波器,可以将输出光谱的线宽进一步窄化。导致谱线展宽的另一个原因是慢轴方向的光经过准直系统准直后,仍然有一定的发散角^[4]。测量光谱时,要把每个发光单元的光谱都测到,经过会聚透镜的光束会聚到光纤探头上是个有一定大小的光斑,应该移动光纤探头在光斑的不同位置观测光谱,以便测量到的光谱是整个阵列的光谱。

3 结 论

激光二极管阵列采用了由快轴准直镜、准直系

统和闪耀光栅构成的外腔。光栅的一阶衍射提供反馈,零阶衍射作为激光输出,激光输出光路中加入光谱滤波器,使激光二极管阵列的线宽由2 nm压缩到0.12 nm,谱线的宽度压缩了16倍,在恒定温度23℃时,实现了激光在806~818 nm的调谐,调谐范围达12 nm。如果配合温度的范围调节,可以实现更大范围的调谐。阵列中各发光单元的排列弯曲是谱线展宽的主要原因。导致谱线展宽的另一个原因是慢轴方向的光经过准直系统准直后,仍然有一定发散角,通过采用放大倍率更高的倒置望远系统,可以将慢轴方向发散角进一步压缩,但这样需要更大面积的光栅。大面积的光栅制造起来难度较大。

参 考 文 献

- 1 Eva Samsøe, Peter E. Andersen. Improvement of spatial and temporal coherence of a broad area laser diode using an external-cavity design with double grating feedback [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(4):609~616
- 2 H. Zhu, I. C. Ruset, F. W. Hersman. Spectrally narrowed external-cavity high-power stack of laser diode arrays [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11):1342~1344
- 3 S. B. Bayrama, T. E. Chupp. Operation of a single mode external-cavity laser diode array near 780 nm [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(12):4169~4171
- 4 Wang Qiang, Zeng Xiaodong, An Yuying. A far-field distribution model describing the double-peak beam of high-power laser diodes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):619~622
王 强,曾晓东,安毓英. 大功率激光二极管双峰结构远场分布模型[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):619~622
- 5 Xu Liu, Changyong Lu, Xiaobing Wang *et al.*. Efficient intracavity optical parametric oscillator with diode side-pumped electro-optic Q-switched laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11):664~666
- 6 Chen Haibo, Chen Jianguo, Yang Hua *et al.*. General analysis on phase locked external cavity laser diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):899~902
陈海波,陈建国,杨 华等. 外腔锁相激光二极管阵列的一般分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):899~902
- 7 Bo Baoxue, Gao Xin, Wang Ling *et al.*. 808 nm wavelength high power semiconductor laser arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6):494~496
薄报学,高 欣,王 玲等. 808 nm 波长高功率阵列半导体激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6):494~496
- 8 B. Chann, I. Nelson, T. G. Walker. Frequency-narrowed external-cavity diode-laser-array bar [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18):1352~1354
- 9 G. L. Abbas, S. Yang, V. W. S. Chang *et al.*. Injection behavior of high-power broad-area diode lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(8):605~607
- 10 L. Goldberg, M. K. Chun. Injection locking characteristics of a 1 W broad stripe laser diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(20):1900~1902
- 11 Stuart MacCormack, Jack Feinberg, M. H. Garrett. Injection locking a laser-diode array with a phase-conjugate beam [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(2):120~122
- 12 R. Petit. *Electromagnetic Theory of Gratings* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1980
- 13 Robert E. Fisher. *Optical System Design* [M]. New York: McGraw-Hill, 2000
- 14 Milton Laikin. *Lens Design* [M]. New York: Marcel Dekker, 2001
- 15 C. L. Talbot, M. E. J. Friese, D. Wang *et al.*. Linewidth reduction in a large-smile laser diode array [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29):6264~6268