

文章编号: 0258-7025(2008)04-0501-04

大功率体光栅外腔半导体激光器的输出特性

薄报学 高欣 乔忠良 王玉霞 卢鹏 李辉 么颜平 刘春玲 黄波 曲轶

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 宽条形大功率半导体激光器(LD)存在光谱温漂系数大、光谱宽度宽的缺点,为了改善宽条形大功率半导体激光器的光谱特性,采用一种体光栅(VBG)离轴外腔方法实现了宽条形大功率半导体激光器光谱特性的明显改善和高效工作。宽条形半导体激光器的外腔结构主要包括激光器输出光束的快、慢轴准直光学透镜和离轴放置的体光栅。宽条形半导体激光器的激射条宽为 $100\ \mu\text{m}$,当激光器工作电流为 $4.0\ \text{A}$ 时,外腔激光器的输出功率高达 $3.4\ \text{W}$,斜率效率为 $1.0\ \text{W/A}$,光谱宽度由自由出射条件下的 $2\sim 3\ \text{nm}$ 减少为 $0.2\ \text{nm}$,峰值波长的温漂系数小于 $0.015\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。

关键词 激光器;半导体激光器;体光栅;外腔;光谱

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

Characteristics of High Power Volume-Bragg-Grating External Cavity Semiconductor Lasers

Bo Baoxue Gao Xin Qiao Zhongliang Wang Yuxia Lu Peng

Li Hui Yao Yanping Liu Chunling Huang Bo Qu Yi

(National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers,

Changchun University of Science & Technology, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract High wavelength shift coefficient varying with temperature and broad spectrum width are disadvantages of the output properties of high power broad-area semiconductor lasers. For improving the output spectral properties of broad-area semiconductor lasers, a volume-Bragg-grating (VBG) off-axis external cavity method was adopted with satisfied effect on spectrum and slope efficiency. The external cavity laser composes of a broad-area stripe semiconductor laser with fast-axis and slow axis beam collimation, and a VBG positioned off-axis. The broad-area stripe semiconductor laser has an emission width of $100\ \mu\text{m}$. High power output is achieved with $3.4\ \text{W}$ at working current with $4.0\ \text{A}$. The slope efficiency is $1.0\ \text{W/A}$, and a narrower output spectrum of $0.2\ \text{nm}$ width is realized compared with free output spectrum width of $2\sim 3\ \text{nm}$. The wavelength shift coefficient varying with temperature is less than $0.015\ \text{nm}/^\circ\text{C}$.

Key words lasers; semiconductor lasers; volume-Bragg-grating; external cavity; spectrum

1 引言

自从 20 世纪 80 年代量子阱结构半导体激光器(LD)的快速发展以来,以宽条形发射区为主要方式的大功率半导体激光器的连续输出功率可达 $16\ \text{W}$ 以上,以宽条形激光器为基本单元的单线阵半导体激光器的输出功率已达 $950\ \text{W}$ 以上^[1,2]。随着大功率半导体激光器技术的迅速发展,其在激光材料处理、激光打孔、激光切割、激光手术、固体激光抽运及

激光照明、激光指示等方面已经具有重要的应用价值和良好的发展前景^[3~9]。然而,宽条形半导体激光器发光光谱宽($2\sim 3\ \text{nm}$)、波长温漂系数大($0.2\sim 0.3\ \text{nm}/^\circ\text{C}$)等问题仍然限制了大功率半导体激光器的一些重要应用。通常抽运 YAG 固体激光器用大功率半导体激光器必须采取精密的温度控制措施以保证抽运源的输出光谱与激光晶体吸收光谱的良好匹配。空间激光通信、激光助视照明要求激光

收稿日期:2007-08-20;收到修改稿日期:2007-11-02

基金项目:国家自然科学基金(60474026,60477010)资助项目。

作者简介:薄报学(1964—),男,教授,主要从事大功率半导体激光器制备技术研究工作。E-mail:bbx@public.cc.jl.cn

光源具有稳定的工作波长和较小的谱宽以高效滤除背景光、提高系统的信号信噪比。由于宽条形半导体激光器的能带发光、多模激射特征和能带宽度对温度的敏感特性,这些问题难以在常规的法布里-珀罗(F-P)腔结构器件中得到解决。采用外腔激光器结构进行激射波长锁定成为半导体激光器特别是大功率器件改善光谱特性的重要手段,近年来国外已有多个研究小组报道了平面光栅特别是体光栅(VBG)外腔方法对激光器输出光谱的改善,国内仅有平面光栅外腔方法的研究报道,均存在着激光器斜率效率明显下降的缺点^[9~12]。体光栅作为一种新型的光栅元件具有体积小、结构简单、功能灵活的优点,可用于窄带反射、窄带透射等诸多应用。本文设计了一种体光栅外腔宽条形半导体激光器结构,体光栅为离轴放置,外腔光耦合系统采用强耦合方式,既显著改善了宽条形半导体激光器的光谱特性,又较大程度地保持了器件的高斜率效率工作。

2 外腔激光器结构

图1为体光栅外腔宽条形半导体激光器的基本结构。宽条形半导体激光器(LD)采用我们实验室研制的宽波导结构器件,发射峰值波长约为808 nm,发光区宽度为100 μm ,连续输出功率可达3 W以上。激光器芯片后腔面电子束蒸镀10对 $\lambda/4$ 光学厚度的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$,腔面反射率大于95%;前腔面蒸镀约 $\lambda/4$ 光学厚度的 Al_2O_3 ,腔面剩余反射率小于5%。FC为快轴准直柱透镜,采用LIMO公司的非球面柱透镜(型号:FAC286-D),SC为慢轴准直柱透镜(型号:SAC-150/500)。FC的有效焦距为0.29 mm,数值孔径(NA)为0.8,将激光器快轴方向光束发散角由自由出射时的 35° (半峰全宽(FWHM))压缩至 0.12° (半峰全宽)以内。SC的有

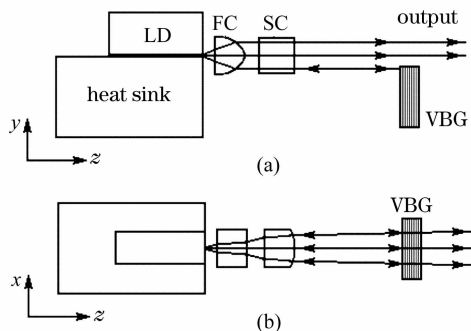


图1 体光栅外腔半导体激光器结构示意图
Fig.1 Schematic setup of VBG external cavity semiconductor lasers

效焦距为1.81 mm,数值孔径为0.09,将激光器慢轴方向光束发散角由自由出射时的 8° (半峰全宽)压缩至 3.5° (半峰全宽)以内。具有窄带光反射特性的体光栅(VBG)由PD-LD Inc.公司制造,离轴放置在经过FC,SC准直的激光光束路径上,部分准直光束经过体光栅的反射重新进入激光器芯片得到反馈放大。体光栅的反射带宽一般小于0.5 nm,反射带宽的温漂系数小于 $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由于体光栅的高温稳定窄带反射特性,使得体光栅外腔半导体激光器的工作波长稳定工作在体光栅的反射带宽之内,离轴的体光栅仅需对极小部分的准直光束产生反射即可满足外腔激光器的光谱锁定,几乎对原激光器芯片的功率输出特性没有影响。

3 结果与分析

研究体光栅外腔半导体激光器的主要目的是改善半导体激光器的光谱特性。图2(a),(b)分别为半导体激光器在自由出射和外腔工作时,不同工作电流条件下的光谱测试结果。激光器光谱测量采用Anritsu公司制造的MS9710B型光谱分析仪。

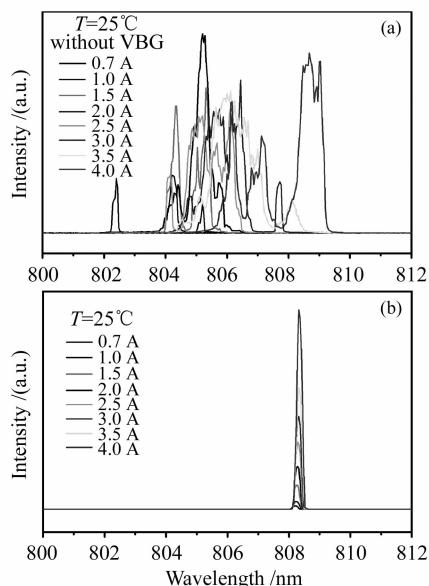


图2 自由出射(a)和体光栅外腔工作(b)半导体激光器在不同电流条件下的光谱特性

Fig.2 Spectra properties of free-running (a) and VBG external cavity (b) semiconductor lasers at different operation currents

从图2(a)中可以看出,随着工作电流的增加,自由出射的宽条形半导体激光器的输出光谱峰值波长明显变长,其峰值波长随工作电流的增加率约为 $1.5 \text{ nm}/\text{A}$ 。同时,自由出射激光器的光谱半峰全宽

较大,且随着工作电流的不同略有增加,一般约为 2~3 nm。这主要是因为:随着工作电流的增加,器件内部的热耗散功率也相应增加,导致量子阱有源区的工作温度明显上升,而对应 GaAs 基半导体材料禁带宽度的发光波长的温度漂移系数约为 0.2~0.3 nm/°C,由此可大致推算出激光器的封装热阻约为 6 °C/W。图 2(b)表明,体光栅外腔宽条形半导体激光器明显改善了其工作的光谱特性,激光器光谱宽度明显变窄约为 0.25 nm,且随工作电流的增加几乎没有明显变化。同时,体光栅外腔宽条形半导体激光器的峰值波长准确锁定在体光栅的反射波长上,随工作电流的增加其峰值波长的增加率仅为 0.023 nm/A,峰值波长稳定性增加约 65 倍。其波长增加主要是由激光器工作电流增加导致内部温度升高而带隙减小引起的。

图 3 为体光栅外腔激光器在不同工作温度下的光谱特性(激光器工作在 4.0 A 的恒定电流条件下)。从图中可以看出,激光器在工作温度 15~30 °C 的范围内保持良好的波长锁定特性,随着工作温度的增加器件输出功率下降,峰值波长略有增加,其温漂系数小于 0.0015 nm/°C。同样,激光器工作温度升高导致带隙减小而引起波长的较小增加。

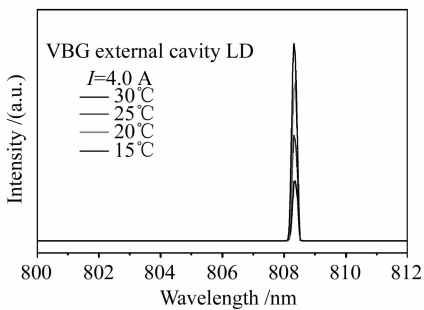


图 3 体光栅外腔工作半导体激光器在不同温度下的光谱特性

Fig. 3 Spectra properties of VBG external cavity semiconductor lasers operated at different temperatures

图 4 为体光栅外腔半导体激光器的输出功率特性曲线。从图中可以看出,在阈值电流以上激光器保持良好的线性输出特性,斜率效率高达 1.0 W/A,与自由出射(无体光栅)条件下的功率输出曲线相比,斜率效率仅有少许下降,阈值电流由于光反馈增加也略有下降。斜率效率下降的主要原因包括两个方面:一是由于光学系统的限制,体光栅反馈光不能全部入射到半导体激光器的波导中,产生了部分反馈光的损失,由于外腔激光器结构中的半导体激光器采用了快慢轴准直技术及离轴反射的光

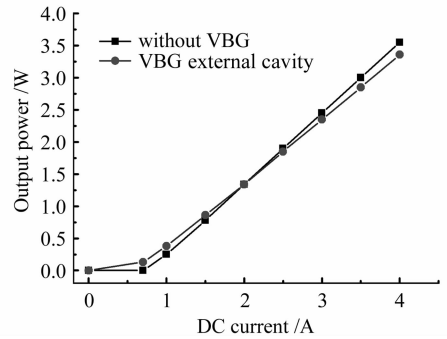


图 4 体光栅外腔工作半导体激光器的 $P-I$ 特性
Fig. 4 $P-I$ characteristics of VBG external cavity

semiconductor lasers

反馈方式,使得该部分光损失明显减少;二是外腔激光器增加了光反馈的强度,同时也会产生较大的腔内光吸收,从而导致激光器效率降低。

图 2~4 结果表明,由于该体光栅外腔结构设计具有较高的光反馈效率,仅需极小的外腔反射功率即可满足激光器在较宽工作条件(工作电流、工作温度)下的光谱锁定。

4 结 论

采用体光栅光学反馈进行了外腔宽条形大功率半导体激光器的设计、制作,实现了宽条形大功率半导体激光器在较宽工作电流、工作温度范围内的高效率工作和输出光谱锁定,光谱宽度达到 0.2 nm,峰值波长的温漂系数小于 0.015 nm/°C,斜率效率达到 1.0 W/A,外腔激光器的最大输出功率达到 3.4 W。

参 考 文 献

- 1 N. A. Pikhtin, S. O. Slipchenko, Z. N. Sokolova *et al.*. 16 W continuous-wave output power from 100 μm -aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(22):1413~1414
- 2 Hanxuan Li, Terry Towe, Irving Chyr *et al.*. Near 1 kW of continuous-wave power from a single high-efficiency diode-laser bar[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13):960~962
- 3 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):577~581
张 强,姚建铨,温伍麒 等. 高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):577~581
- 4 Zou Lei, Ding Xin, Wei Quanfu *et al.*. High power, high efficiency, all-solid-state quasi-continuous-wave Ti:sapphire laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1409~1412
邹 雷,丁 欣,魏科夫 等. 高功率、高效率、全固态准连续钛宝石激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1409~1412
- 5 Zhou Shouhuan, Jiang Dongsheng, Zhao Hong. Diode pumped high power, frequency doubling Nd:YAG Laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(2):97~99

- 周寿桓,姜东升,赵 鸿. 二极管抽运的高功率、倍频 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2001, **A28**(2):97~99
- 6 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous wave 714 W fiber laser with China made large mode area double clad fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1119~1120
- 周 军,楼祺洪,朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. 光学学报, 2006, **26**(7):1119~1120
- 7 Guo Mingxiu, Li Jindong, Fu Wenqiang *et al.*. Kilowatt laser diode pumped solid state heat capacity slab laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):280~286
- 郭明秀,李劲东,付文强等. 千瓦级半导体抽运的固体热容板条激光器[J]. 光学学报, 2007, **27**(2):280~286
- 8 Yao Zhenyu, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. 1.5 kW laser diode pumped Nd:YAG disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):37~40
- 姚震宇,蒋建锋,涂 波等. 1.5 kW 激光二极管抽运 Nd:YAG 薄片激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(1):37~40
- 9 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
- 10 Yujin Zheng, Xin Gao, Hirofumi Miyajima *et al.*. High-brightness narrow-bandwidth high-power laser-diode array based on an external-cavity technique [J]. *Japan. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(10A):L1299~L1301
- 11 Ge Jianhong, Chen Jun, Andreas Hermerschmidt *et al.*. Single lobed nearly diffraction limited output from a laser diode with external cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):773~776
- 葛剑虹,陈 军,Andreas Hermerschmidt等. 单瓣近衍射极限输出的带外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(7):773~776
- 12 Su Zhouping, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Linewidth-narrowed, tunable laser diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):751~754
- 苏宙平,楼祺洪,董景星等. 激光二极管阵列的窄线宽、可调谐输出[J]. 中国激光, 2007, **34**(6):751~754