

文章编号: 0258-7025(2004)07-0773-04

# 单瓣近衍射极限输出的带外腔半导体激光器

葛剑虹<sup>1</sup>, 陈 军<sup>1</sup>, Andreas Hermerschmidt<sup>2</sup>, H. J. Eichler<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)  
(<sup>2</sup> 柏林工业大学光学所, 德国 柏林 10623)

**摘要** 实验研究了带外腔反馈注入的宽接触条形激光器,并用光线传输矩阵分析了该外腔结构。利用闪耀光栅及耦合输出反射镜对表面未镀增透膜的半导体激光器构成外腔,选择一定模式的激光反馈注入回激光器,从而限制了其他模式在半导体激光器内的振荡,压缩了激光器输出激光的光谱宽度。当激光器驱动电流为 2.7 倍阈值电流时,获得 230 mW 输出功率,0.6 nm 谱宽,单瓣近衍射极限的激光输出。用一平面镜代替光栅作为外腔反射镜,获得了 320 mW 输出功率,1.5 nm 谱宽的单瓣近衍射极限的激光输出。

**关键词** 激光技术;宽接触条形激光器;外腔;反馈注入

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Single-Lobed Nearly Diffraction-Limited Output from a Laser Diode with External Cavity

GE Jian-hong<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, Andreas Hermerschmidt<sup>2</sup>, H. J. Eichler<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)  
(<sup>2</sup> Optical Institute, Technical University of Berlin, Berlin 10623, Germany)

**Abstract** A broad area laser diode (BALD) with external cavity feedback is experimentally investigated and analyzed by using ray transfer matrices. In the experiment, a grating or a plane mirror that is placed at the image plane of the output facet of the BALD is used as an external cavity mirror. By tilting the grating or plane mirror, the certain transverse mode is selected and other transverse modes oscillating in the cavity are limited. With this setup, a single-lobed nearly diffraction-limited laser beam with an output power of 230 mW and a spectral line width of 0.6 nm (300 GHz) is obtained with a grating, while a laser beam with an output power of 320 mW and a spectral line width of 1.5 nm is obtained with plane mirror.

**Key words** laser technique; broad area laser diode; external cavity; feedback

## 1 引 言

高功率半导体激光器由于其体积小、寿命长、效率高、结构紧凑、可以输出大功率的激光而越来越广泛地用于各个方面,诸如微加工、信息处理和国防尖端技术等众多领域<sup>[1]</sup>。然而,高功率半导体激光器存在空间相干性差,光谱较宽的缺点,因此如何提高高功率激光器的相干特性已成为研究的热点。至今已经发展了多种技术,诸如外腔反馈<sup>[2,3]</sup>、注入锁

定<sup>[4]</sup>、一体化非稳腔<sup>[5]</sup>等来提高高功率半导体激光器的相干特性。但是注入锁定需要对主、从激光器进行精确的温度控制,并且需要昂贵的光隔离器防止激光由从激光器反馈到主激光器里。丹麦的 S. Juul Jensen 等<sup>[6]</sup>通过带位相共轭镜的外腔系统,实现了在较低驱动电流下获得单模运转。这个系统的优点在于它的自准直,但是这种方法不是很实用,因为用作位相共轭镜的光折变晶体在低于相变温度时

收稿日期:2003-01-14;收到修改稿日期:2003-07-09

基金项目:国家自然科学基金(编号:60278038)和德国联邦教育与研究部(BMBF)资助项目。

作者简介:葛剑虹(1972—),女,浙江大学光电信息工程学系讲师,博士,主要从事激光及非线性光学研究。E-mail: gejh2000@hotmail.com

就会产生变相现象,造成晶体永久性损坏,所以系统对温控的要求很高。

本文提出了一个简单、有效并有着很好的模式鉴别率,同时对腔内器件的失调不灵敏的外腔反馈注入系统。

## 2 实验装置与结果

实验装置如图 1 所示。在慢轴平面里,半导体激光器发出的激光经柱透镜  $L_2$  准直后,其中部分激光由球面透镜  $L_4$  会聚后入射至闪耀光栅。光栅放置成利特罗结构,其刻划线与慢轴平行,所以在这个平面里,光栅作为外腔反射镜,起到和一个普通的平面镜相同的作用。调节光栅在这个平面内的倾斜角,可以选择需要的模式反馈注入回激光器,然后在激光器内经放大后输出。系统的模式选择是通过在慢轴平面内前后移动棱镜和调节光栅的倾斜角来完成的。在快轴平面里,半导体激光器发出的激光经一个大数值孔径的快轴准直透镜  $L_1$  准直后,再经倒置望远镜组  $L_3$  和  $L_4$  的扩束后入射至光栅,在这个平面内,光栅用作波长选择器件,只有被选择波长的一级衍射光才能反馈注入回激光器,从而压缩了光谱宽度。

实验中所用的半导体激光器是宽接触条形激光

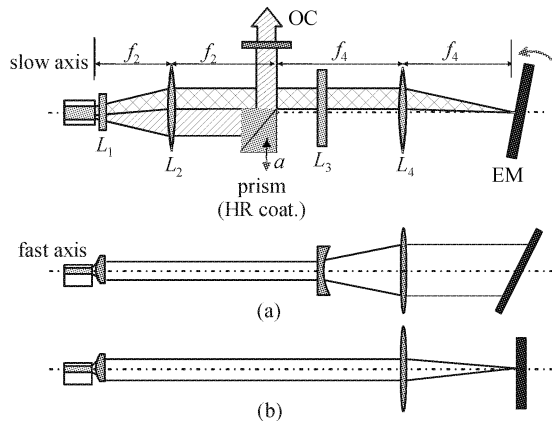


图 1 实验装置图

上半部分是慢轴平面内的装置图,下半部分是两种方案在快轴平面内的装置图。(a) 准直系统;(b) 会聚系统。 $L_1 \sim L_3$ : 柱透镜; $L_4$ : 球面透镜; $f_1 = 500 \mu\text{m}$ ;  $f_2 = 100 \text{ mm}$ ;  $f_3 = -25 \text{ mm}$ ;  $f_4 = 200 \text{ mm}$ ; OC: 输出耦合镜; EM: 光栅或平面镜

Fig. 1 Experimental setup

upper part; setup at slow axis; low part: two different versions of the setup at fast axis. (a) collimated geometry; (b) focused geometry.  $L_1 \sim L_3$ : cylindrical lens;  $L_4$ : spherical lens;  $f_1 = 500 \mu\text{m}$ ;  $f_2 = 100 \text{ mm}$ ;  $f_3 = -25 \text{ mm}$ ;  $f_4 = 200 \text{ mm}$ ; OC: output coupler; EM: grating or plane mirror

器(BALD),发光截面为  $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ,最大输出功率 3 W,发光阈值 0.365 A,斜率效率 1.23 W/A。闪耀光栅为 400 线/mm,闪耀波长为 850 nm,808 nm 波长的激光一级衍射的效率为 62%。光栅放置在球面透镜  $L_4$  的后焦面上。实验中所用的平面镜和棱镜都镀了对 808 nm 的高反膜。

激光器自由振荡输出和带外腔的输出功率如图 2 所示。在使用平面镜作外腔镜的情况下,激光器的输出功率甚至比自由振荡时的输出功率要高。当使用光栅时,由于衍射效率的原因,输出功率比起用平面镜作外腔镜的情况要低 30%。

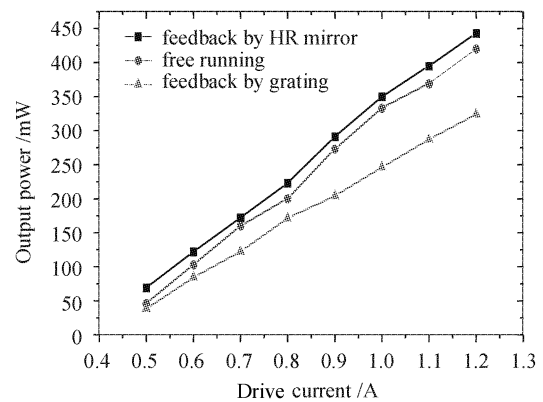


图 2 激光器自由振荡和带外腔的输出功率图

Fig. 2 Output power of BALD with and without feedback versus drive current

激光器输出的远场强度分布如图 3 所示。图 3(a)为自由振荡时的激光器输出,图 3(b)为带外腔注入反馈的激光器输出,半宽度(FWHM)仅为  $0.54^\circ$ 。如果引用衍射极限的定义  $\theta_D = 0.886\lambda/D^{[5]}$ ,那么实验中所用的激光器的衍射极限是  $0.41^\circ$ 。这样,在 2.7 倍阈值电流的驱动电流下,获得了光束质量为 1.3 倍衍射极限的输出激光。但是,随着驱动电流的增加,外腔的作用会逐渐减弱,因为此时的反馈注入相应于激光器内部的激光辐射比较弱。

当用光栅作外腔镜时,激光器的谱宽从 2.6 nm 降至 0.7 nm,如图 4 所示。

## 3 利用光线传输矩阵对外腔的理论分析

通常有两种外腔结构,一种称之为准直型外腔,其光路简示于图 1(a);另一种是会聚型外腔,如图 1(b)所示。利用光线传输矩阵对这两种外腔进行理论分析和比较。定义如下,  $(r_0, \theta_0)$  为最初从激光器

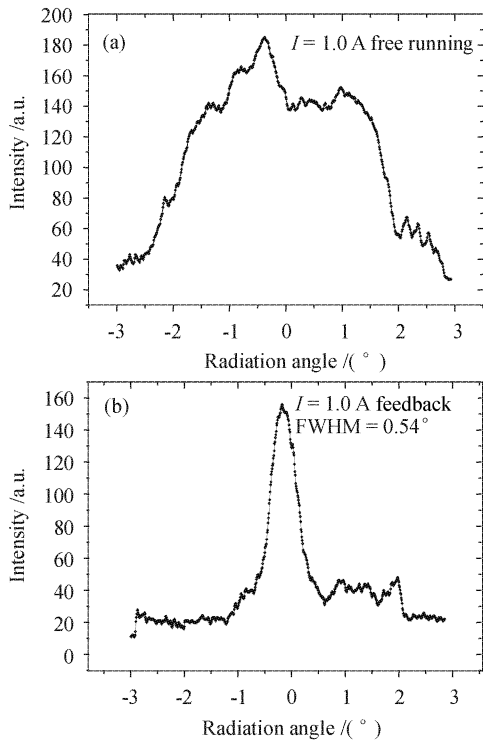


图 3 激光器输出的远场强度分布

(a) 自由振荡输出; (b) 带外腔输出

Fig. 3 Far field beam profile

(a) free running output; (b) output with feedback

出射的一条光线, 在经过一个往返再回到激光器的光线为  $(r, \theta)$ , 外腔镜的倾斜角为  $\omega$ 。所以在会聚型外腔结构中

$$r = r_0(c_1 + c_2\omega + c_3\omega r_0 + c_4\omega r_0^2) \quad (1)$$

而在准直型外腔结构中

$$r = -r_0 + c_5\omega \quad (2)$$

在这两个方程中,  $c_i$  为由透镜的焦距所决定的常量。可以推导出对于会聚型外腔而言, 外腔镜倾斜角的容差由透镜的孔径决定。而对于准直型外腔结构, 外腔镜倾斜角的容差则是由激光器发光面的截面积决定的(一般是  $1 \sim 100 \mu\text{m}$ ), 所以这种结构对于倾斜角的失调非常灵敏。这就是我们实验系统在慢轴平面采用如图 1 所示的会聚型外腔结构的原因, 这种结构的外腔在很大程度上降低了外腔镜失调的灵敏性。

在快轴方向同样有这两种结构。当用光栅作外腔镜时, 准直型结构的失调灵敏度也大大降低, 因为光栅的轻微倾斜只会造成反馈注入的激光波长略有偏移, 并且这个准直型的结构还有一个优点是光栅可以获得足够的照明区域, 以提高纵模的鉴别率。由此, 用光栅作外腔镜时, 在快轴方向我们选用准直

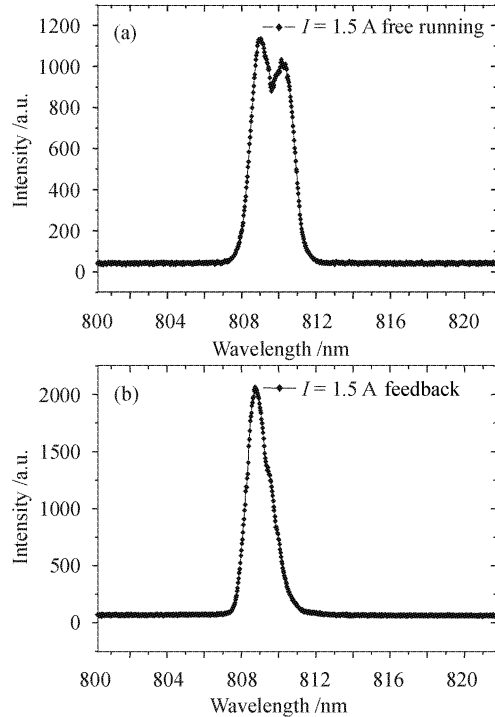


图 4 输出光谱图

(a) 自由振荡输出, FWHM=2.6 nm;

(b) 带外腔输出, FWHM=0.7 nm

Fig. 4 Optical spectrum

(a) free running output, FWHM=2.6 nm;

(b) output with feedback, FWHM=0.7 nm

型结构, 并且在这个方向把激光器发射截面看成一个点光源。当用平面镜作外腔镜时, 还是选用会聚型结构。

外腔对横模的选择可以通过光线传输矩阵的推导用以下的式子来描述。参数定义如前所述, 则

$$\begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0 + 2\omega\left(\omega - \frac{f_2}{f_4}\theta_0\right)r_0 \\ \theta_0 - 2\frac{f_4}{f_2}\omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过调节外腔镜的倾斜角  $\omega$ , 远场发射角为  $\theta_0$  (横模  $m$  的远场发射角为  $\theta_m$ ) 的那个模式被选中, 并且沿着原来的光路被反馈注入回激光器, 然后这个模式的激光在激光器内得到放大并输出。对于其他模式  $\theta_0 = \theta_m + \delta\theta$ , 有

$$\begin{bmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_0\left(1 - 2\frac{f_2^2}{f_4^2}\theta_m\delta\theta\right) \\ -(\theta_m - \delta\theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

基模 ( $m = 1$ ) 在远场是一个单瓣图样, 而其他高阶模的远场都是分开的双瓣图样, 两个光瓣之间的角度为

$$\theta_m = \frac{m\lambda}{4x_0} \quad (5)$$

式中,  $\lambda$  为出射激光的波长,  $x_0$  为激光器发光截面的长度的一半<sup>[7]</sup>。

通过改变用作输出镜的棱镜的位置参数  $a$  (如图 1 所示,  $a$  为棱镜在慢轴平面内前后移动偏离光轴的距离), 可以限制入射到外腔镜和反馈注入回激光器的模式数。

## 4 结 论

用光线传输矩阵分析了一个带光栅或者平面镜的外腔系统的 3 W 宽接触激光器。通过理论推导和实验证实了在会聚型结构中, 外腔镜失调的不灵敏性。通过这个系统, 在 2.7 倍阈值电流的驱动下, 获得了输出功率为 200~400 mW, 谱宽在 0.6~1.5 nm 的单瓣近衍射极限激光输出。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 C. J. Chang-Hasnain, J. Berger, D. R. Scifres *et al.*. High power with high efficiency in a narrow single-lobed beam from a diode laser array in an external cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(21):1465~1467
- 3 Wang Junmin, Yang Weidong, Xie Changde *et al.*. Frequency tuning characteristics of single-mode GaAlAs semiconductor laser with weak feedback from a blazing grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4):463~467  
王军民, 杨伟东, 谢常德等. 闪耀光栅弱反馈 GaAlAs 单模半导体激光器的频率调谐特性[J]. *光学学报*, 1999, **19**(4):463~467
- 4 J. M. Verdiell, R. Frey, J. P. Huignard. Analysis of injection-locked gain-guided diode laser arrays [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(3):396~401
- 5 M. L. Tilton, G. C. Dente, A. H. Paxton *et al.*. High power, nearly diffraction-limited output from a semiconductor laser with an unstable resonator [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(9):2098~2108
- 6 S. Juul Jensen, M. Løbel, P. M. Petersen. Stability of the single-mode output of a laser diode array with phase conjugate feedback [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(5):535~537
- 7 Ramadas M. R. Pillai, Elsa M. Garmire. Paraxial-misalignment insensitive external-cavity semiconductor-laser array emitting near-diffraction limited single-lobed beam [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(6):996~1008