

文章编号: 0258-7025(2006)12-1601-04

外腔半导体激光器的空间模式特性分析

葛剑虹, 项震*, 刘崇, 陈军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 通过对宽发光截面半导体激光器(BAL)输出激光空间特性和远场分布的理论分析,并根据激光振荡的自再现原理,导出了反馈注入外腔宽发光截面半导体激光器输出激光的光场分布。计算表明外腔的反馈作用可以看作是频谱面上引入了一个带通滤波器,通过选择特定模式的频谱分量进行反馈注入,从而实现选模和改善输出激光光束质量的目的。完成了相应的外腔反馈注入宽发光截面半导体激光器的实验,获得了单瓣近衍射极限的激光输出,在工作电流为1.18倍阈值电流时,获得远场发散角为 0.074° 的输出激光,计算得相应的光束衍射倍率因子 M^2 为1.16,和理论计算的结果基本吻合。

关键词 激光技术;宽发光截面半导体激光器;外腔反馈;光束质量

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Investigation of Beam Quality of External Cavity Laser Diodes

GE Jian-hong, XIANG Zhen, LIU Chong, CHEN Jun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The beam quality and far-field beam profile of broad-area diode laser (BAL) are investigated. In accord with the theory of self-consistency, the wave propagation of the output laser of external cavity BAL is calculated. In Fourier optic methods, the external cavity can be interpreted as a spatial filter in the Fourier plane of the laser diode. The transverse mode can be selected by changing the position of the filter. The relative external cavity BAL experiment is completed, and a single-lobed output beam of the external cavity BAL is achieved. The output laser with divergence angle of 0.074° (full-width of half-maximum (FWHM)) and corresponding M^2 factor of 1.16 is obtained when external cavity feedback at $I = 1.18I_{th}$, which agrees well with the theoretical result.

Key words laser technique; broad-area diode laser; external feedback; beam quality

1 引言

由于半导体激光器(LD)侧向多模振荡所造成的光束质量和相干性较差的缺点使其应用受到很大的限制,因此如何提高和改善半导体激光器的输出光束质量一直是近年来研究的热点。其中利用外腔进行选择性地反馈是改善半导体激光器光束空间模式的一种有效手段,甚至可获得近衍射极限输出的光束^[1~5]。已有文献报道的实验装置按照外腔反射镜的位置不同大致可以分为两类,一类是在像平面进行反馈^[1~3],一类是在成像透镜的后焦面即傅里

叶平面上进行反馈^[4,5]。这两类装置的基本原理类似,即在光场的空间频谱面上构造一个空间滤波器,从而使半导体激光器输出光束中的某一阶或几阶模式被选择性地反馈,在半导体激光器腔内获得增益放大,最终形成振荡输出,而其他模式则被抑制。

利用增益导引阵列(gain guided array)的半导体激光器进行外腔反馈注入已较为成熟。根据阵列模的理论^[6,7],高阶阵列模的远场具有双瓣(twin-lobe)结构,在反馈注入时对其中的一个光瓣进行反射,使其再次注入回半导体激光器,而另一光瓣则被耦合输出。这时耦合输出的光束已经不能再看作半

收稿日期:2006-01-16;收到修改稿日期:2006-06-14

基金项目:浙江大学现代光学仪器国家重点实验室开放课题资助项目。

作者简介:葛剑虹(1972—),女,江苏无锡人,浙江大学光电信息工程学系讲师,博士,主要从事激光与非线性光学方面的工作。E-mail:jianhong@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:xiangzhen@zju.edu.cn

导体激光器的模式,而是把外腔激光器看作一个整体,这种模式可以称之为外腔的模式,或者简称腔模(cavity mode)。并且为了提高反馈和输出的效率,通常选择半导体激光器输出的高阶模进行反馈。

随着半导体工艺的提高,宽发光截面半导体激光器(BAL)逐渐商用化。宽发光截面半导体激光器也被广泛用于外腔反馈注入获得高质量半导体激光器激光输出,并且获得了很好的实验结果^[8,9],但是相关宽发光截面半导体激光器的空间模式特性和外腔反馈注入的理论尚少见报道。

本文首先分析了宽发光截面半导体激光器的空间模式特性,然后针对在像面进行反馈的外腔做了详细的理论分析,并给出了与物理含义较为一致的解释。

2 宽发光截面半导体激光器的空间模式及远场特性

宽发光截面半导体激光器有源区的侧向(沿 p-n 结的方向)尺寸通常为 100 μm 左右,根据波导理论,在这个尺寸范围内可以允许很多模式的存在,实验中也证实了宽发光截面半导体激光器是多侧模同时起振。宽发光截面半导体激光器的侧模可以用一维平板波导的解来近似,如果不考虑波导外部的辐射损耗,可认为在波导边界上光场的复振幅为零,则复振幅可以简单地表示为^[10]

$$\Psi_m = \frac{1}{\sqrt{x_0}} \sin\left(\frac{m\pi \cdot x}{2x_0} + \frac{m\pi}{2}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{x_0}\right), \quad (1)$$

式中 x_0 为宽发光截面半导体激光器有源区的半宽, m 为模式的阶数, $\text{rect}(x/x_0)$ 为矩形函数,在 $|x| < x_0$ 时为 1,其他为 0。模式的传播常数为

$$\beta_m = n(m)k_0 - i \frac{g_0}{2}, \quad (2)$$

其虚部表示模式增益,实部 $n(m)k_0 = \sqrt{n_0^2 k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{2x_0}\right)^2}$ 表示模式的相位传播常数,其中 k_0 为自由空间的传播常数。

对于宽发光截面半导体激光器的每一阶模式来说,都可以看作两个不同方向传播的平面波的叠加,传播方向和 z 轴的夹角为 $\theta_m = \pm \frac{m\pi}{2k_0 x_0}$,考虑到平面波通过有限宽的狭缝后的衍射,在远场的分布应该是双瓣结构。只有 $m = 1$ 的基模远场是单瓣结构,原因是基模的 θ_m 太小,所以远场叠加后仍为单瓣。

3 外腔反馈的实验装置

实验中所用的宽发光截面半导体激光器是 GaAsP/AlGaAs 材料增益导引结构,发光截面为 100 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$,腔长为 500 μm ,输出激光波长为 808 nm,前腔镜镀了增透膜。普通商用半导体激光器的前腔镜通常镀反射率为 5% 的增透膜。文中采用的宽发光截面半导体激光器镀了反射率为 0.1% 的增透膜,其未加反馈时的阈值电流为 964 mA,最大输出功率为 2 W。

实验装置如图 1 所示。其中 L_1, L_2 分别为用于快轴平面和慢轴平面内的激光准直柱透镜,透镜焦距分别为 $f_1 = 500 \text{ mm}$, $f_2 = 100 \text{ mm}$ 。棱镜镀了对 808 nm 的高反膜,通过前后移动其位置,同时起到反射镜和矩形光阑的作用,用于选择透过激光模式和输出激光。高反镜也镀了对 808 nm 的高反膜,通过调整其倾斜角把透过光阑的所选模式反馈注入回宽发光截面半导体激光器。实验装置中的光栅和标准具用于选纵模,以压缩宽发光截面半导体激光器输出激光的谱宽。光斑通过 L_4 成像于 CCD 光敏面上,用于记录输出激光的光斑。

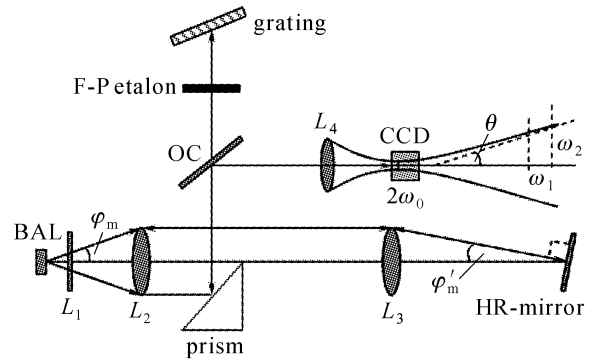


图 1 实验装置图 (p-n 平面内)

Fig. 1 Experimental setup of external cavity BAL in the plane of the p-n junction

具体实验过程为:在宽发光截面半导体激光器的快轴平面内,柱透镜 L_1 用于激光在快轴平面内的准直。在慢轴平面内,输出激光束由柱透镜 L_2 准直后经球面透镜 L_3 (焦距 $f_3 = 200 \text{ mm}$) 会聚入射至平面反射镜,该平面反射镜被放置于宽发光截面半导体激光器的像面上。反馈注入的横模选择是通过倾斜平面镜和前后移动棱镜来实现。当平面反射镜在慢轴平面内旋转时,只有垂直于平面镜入射的那部分光线才能被平面镜沿入射光路原路反射注入回宽发光截面半导体激光器,在宽发光截面半导体激光器内得到放大,形成输出激光。其余模式的激光在

腔内来回振荡一周之后就会逸出。同时腔内放置法布里-珀罗(F-P)标准具来选择纵模并反馈,从而压缩了输出激光的谱宽。腔内振荡的激光由输出耦合镜 OC 耦合输出。

4 外腔对模式的选择作用

这里只讨论对横模的反馈作用,对纵模的影响未作讨论。为了便于分析外腔反馈对横模的作用,把图 1 简化为图 2 所示的原理图。

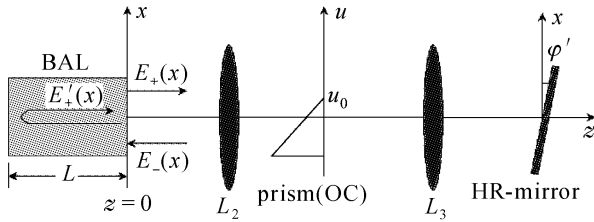


图 2 外腔理论模型简图

Fig. 2 Schematic of the external cavity used for theoretical analysis

设宽发光截面半导体激光器的前表面 ($z = 0$) 处的沿 $+z$ 方向传播的光场为 $E_+(x)$, 可以表示为各个本征模的叠加

$$E_+(x) = \sum_{m=1}^N a_m \Psi_m(x), \quad (3)$$

式中 a_m 为第 m 阶模式的复数权重因子, N 为能够振荡的最高阶模式的阶数。透镜 L_2 和 L_3 对光场影响可以写为对光场复振幅的傅里叶变换, 透镜后焦面上的棱镜相应于一个符号函数 $\text{sign}(u - u_0)$, 当 $u > u_0$ 时为 1, 其余为 0, 这里的自变量 u 为空间频率。倾斜角度为 φ' 的平面镜相应于一个相位变换器 $\exp(-i2k_0 x \tan \varphi')$ 。这样, 经过外腔反馈一周宽发光截面半导体激光器前表面处沿 $-z$ 方向传播的光场为

$$E_-(x) = F\{F\{F\{F[E_+(x)] \cdot \text{sign}(u - u_0)\} \cdot \exp(i4\pi x \varphi'/\lambda)\} \cdot \text{sign}(u - u_0)\}, \quad (4)$$

式中 F 表示傅里叶变换。将(4)式重新化简后可写为

$$E_-(x) = F\left\{F\left[E_+(-x)\right] \Big|_{u=u-\frac{2\varphi'}{\lambda}}\right\} \cdot \text{rect}\left[\frac{u - (\varphi'/\lambda)}{2\varphi'/\lambda - 2u_0}\right], \quad (5)$$

把(3)式代入(5)式中得到

$$E_-(x) = \sum_{m=1}^N b_m \Psi_m(x), \quad (6)$$

$$b_m = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \left[\sum_{n=1}^N a_n \Psi_n(x) \exp\left(-i2\pi \frac{2\varphi'}{\lambda} x\right) \right] \otimes \right.$$

$$\left. F\left\{\text{rect}\left[\frac{u - (\varphi'/\lambda)}{2\varphi'/\lambda - 2u_0}\right]\right\} \cdot \Psi_m(x) dx, \quad (7)$$

符号 \otimes 表示卷积。设宽发光截面半导体激光器前表面的反射率为 0, 后表面的反射率为 1, 光场在宽发光截面半导体激光器内部往返一周后, 其复振幅可以写为

$$E'_+(x) = \sum_{m=1}^N b_m \Psi_m(x) \exp(g_m 2L + i\beta_m 2L), \quad (8)$$

其中 g_m 为第 m 阶模式的增益因子。根据激光振荡的自再现原理, 则有

$$E'_+(x) = E_+(x), \quad (9)$$

比较(3)和(9)式可以得到权重因子 a_m 的表达式为

$$a_m = b_m \exp(g_m 2L + i\beta_m 2L), \quad (10)$$

公式(5)具有重要的物理意义, 外腔的反馈作用可以看作是频谱面内引入了一个带通滤波器, 从而选择特定模式的频谱分量进行反馈。从物理意义上来看, (5)式可以这么理解, 棱镜 P 的光阑作用, 相当于在透镜 L_2 的后焦面上形成了一个狭缝, 该狭缝即对应了矩形函数 $\text{rect}\left[\frac{u - (\varphi'/\lambda)}{2\varphi'/\lambda - 2u_0}\right]$ 。从公式(5)可以看出, 平面镜的倾角 φ' 决定了带通滤波器的中心位置, 棱镜的位置 u_0 决定了滤波器的带宽。因此改变 φ' 和 u_0 就可以选择不同的模式, 实验中也正是通过调节平面镜和棱镜的位置来选择宽发光截面半导体激光器输出的模式。

图 3(a) 为计算得到的外腔反馈后宽发光截面半导体激光器输出激光模式, 通过改变滤波器的参数得到了第 2, 5, 10 阶模式的远场分布。

图 3(b) 为实验得到的反馈前后宽发光截面半导体激光器输出模式的远场分布。因为在实验中选取了高阶模作为反馈注入的模式, 所以图中所得波形为高阶模式的远场分布, 和图 3(a) 中第 10 阶模式的远场分布较吻合。

根据(6)式, 外腔的作用相当于选择了一个或数个高阶模式振荡, 并将远场光束两瓣中的一瓣作为输出。其中的一瓣可以认为是高斯光束, 束腰的大小近似认为是半导体激光器有源区的尺寸 ($100 \mu\text{m}$), 当光束束腰正好位于准直透镜 L_2 的焦平面上时, 经过透镜变换以后, 其远场发散角可以写为^[11]

$$\theta' = \frac{\pi \omega_0^2}{f \lambda} \theta, \quad (11)$$

式中 f 为透镜的焦距, ω_0 和 θ 分别为变换前光束的束腰和发散角。对于基模高斯光束, 有 $M^2 = \pi \omega_0 \theta / \lambda = 1$, 将 $\omega_0 = 100 \mu\text{m}$ 和 $f = 100 \text{ mm}$ 代入(11)式计

算得到 $\theta' = 0.0573^\circ$ 。和图 3(b)中所示的实验测得远场分布的半高宽为 0.074° 较吻合。

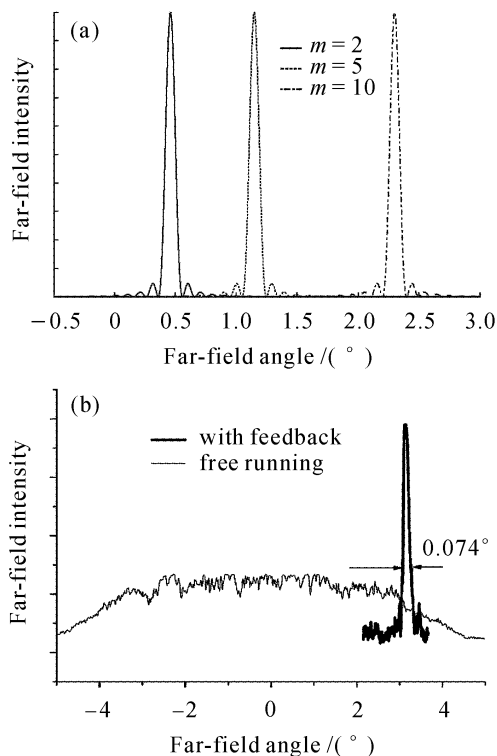


图3 理论(a)和实验(b) ($I = 1.18I_{th}$) 情况下外腔作用下的激光输出远场分布图样

Fig. 3 Far-field profile of theory (a) and experiment (b) ($I = 1.18I_{th}$) of the output beam from external cavity

5 结 论

通过对宽发光截面半导体激光器输出激光空间特性和远场分布的理论分析,计算了在像面上反馈注入外腔宽发光截面半导体激光器输出光束的光场分布形式,结果表明当平移棱镜的前后位置时,相应于在这个傅里叶平面放置了一个狭缝空间滤波器,从而达到了空间选模的作用。宽发光截面半导体激光器输出光束的远场光斑为单瓣图样,且均位于相应的高阶模位置,这是选择了能量最大的高阶模反馈注入的结果,这在理论分析和具体实验中都有体现。

参 考 文 献

- 1 Chen Jun, Wu Xiaodong, Ge Jianhong *et al.*. Broad-area laser diode with 0.02 nm band-width and diffraction limited output due to double external cavity feedback [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(4):525~527
- 2 Jianhong Ge, Jun Chen, Andreas Hermerschmidt *et al.*. Achieving single-lobed far-field patterns of broad area laser diode with external cavity feedback [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6):334~336
- 3 R. M. R. Pollai, E. M. Gammier. 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
- 4 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
- 5 C. J. Chang-Hasnain, A. Dienes, J. R. Whinnery *et al.*. Characteristics of the off-centered apertured mirror external cavity laser array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(6):484~486
- 6 J. K. Butler, D. E. Ackley, D. Botez. Coupled-mode analysis of phase-locked injection lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(3):293~295
- 7 E. Kapon, J. Katz, A. Yariv. Supermode analysis of phase-locked arrays of semiconductor lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1984, **10**(4):125~127
- 8 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
- 9 Liu Chong, Ge Jianhong, Chen Jun. Investigation of loss and threshold characteristics in the laser diode with external feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1413~1416
刘崇,葛剑虹,陈军.外腔反馈注入半导体激光器的损耗和阈值电流特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1413~1416
- 10 Jean-Marc Verdiell, Robert Frey. A broad-area mode-coupling model for multiple-stripe semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(2):270~279
- 11 Zhou Binkun, Gao Yizhi, Chen Chourong *et al.*. Laser Principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984. 110
周炳琨,高以智,陈侗嵘等.激光原理[M].北京:国防工业出版社,1984. 110