

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0010-03

# 激光二极管阵列高阶侧模的外腔锁定

钱凌轩, 施鹏程, 陈建国, 冯振中

(四川大学光电系, 四川 成都 610064)

**摘要** 理论分析表明, 在较短外腔作用下, 激光二极管阵列(LDA)的高阶侧模有实现相位锁定的可能。实验测得, 当外腔较短时 LDA 的远场光强分布呈现主旁瓣结构, 且旁瓣中包含有标志锁相的峰、谷结构, 这正是高阶侧模相位锁定的结果。该结果证实, 在外腔较短情况下, LDA 高阶侧模相位锁定的现象是存在的。

**关键词** 激光技术; 激光二极管阵列; 外腔; 高阶侧模; 相位锁定

**中图分类号** TN248.4      **文献标识码** A

## Laser Diode Array High-Order Lateral Modes Phase Locking in External Cavity

QIAN Ling-xuan, SHI Peng-cheng, CHEN Jian-guo, FENG Zhen-zhong

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** It is theoretically found that phase locking high-order lateral modes of laser diode array (LDA) with a short external cavity can be realized. The far field pattern, which comprises a main lobe and side lobes, is observed for a LDA positioned in a short external cavity. There are structures composed of peaks and valleys, symbolizing phase locking, within the side lobes. From these results, it can be concluded that the phase locking of high-order lateral modes of LDA exists when the external cavity is short enough.

**Key words** laser technique; laser diode array; external cavity; high-order lateral mode; phase locking

### 1 引 言

在激光二极管阵列(LDA)的诸多应用领域, 通常采用的 LDA 具有发光区宽度较宽、发光单元间距较大的特点。发光区宽度较宽是为了使 LDA 能提供稳定的高功率输出, 而增大发光单元间距则是出于散热等方面的考虑<sup>[1~3]</sup>。但单元间距的增大使得 LDA 的发光单元间彼此近乎独立, 无实质性的耦合, LDA 输出的相干特性变差。通常可以采用外腔技术来改善 LDA 输出特性, 即利用外腔反射镜使某一发光单元发出的一部分光耦合进相邻单元中, 从而将各个单元光场的相位锁定, 最终达到改善 LDA 输出光场特性的目的<sup>[4~8]</sup>。此外, 发光单元的发光区宽度较大将有可能引起 LDA 慢轴方向上高阶侧模的混合运行。高阶侧模的光强极大值方向往往不在 LDA 前端面的轴向上<sup>[9]</sup>, 因此, 经外腔镜反射后高阶侧模是有可能耦合进入相邻单元, 从而实现 LDA 高阶侧模的相位锁定。

该结论在实验上得到证实: 当外腔长度较短时, 在测得的远场光强分布图上, 主瓣的两侧出现了旁瓣, 且旁瓣中包含有标志着锁相的峰、谷结构, 这正是由于外腔较短时, 发散角较大的高阶侧模能够在相邻单元间耦合, 实现了高阶侧模锁定的结果。

### 2 理论分析

图 1 给出了外腔中两个相邻发光单元(A, B)间的光学耦合光路示意图。如图所示, 在距 LDA 前端面一定距离处放置一面高反平面镜, 初始位于  $M_0$  处, 且假设刚好满足从单元 A 发出的发散角为  $\theta_0$  的基侧模被外腔镜反射后能耦合进单元 B 中, 达到基侧模锁相。现沿外腔轴向平移外腔镜至  $M_1$  处, 不难看出, 由于外腔长度的缩短, 从单元 A 发出的基侧模无法进入相邻单元, 而发散角为  $\theta_1$  ( $\theta_1 > \theta_0$ ) 的高阶侧模却可以经外腔镜反射后耦合进单元 B 中。此时, 基侧模在相邻单元间不能实现有效的耦合, 而

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会、中国工程物理研究院联合基金(10276026)资助课题。

**作者简介:** 钱凌轩(1981—), 男, 四川大学硕士研究生, 主要从事激光二极管技术的研究。E-mail: jackyqian@eyou.com

发散角为  $\theta_1$  的高阶侧模可以通过相邻单元间的耦合实现相位锁定。

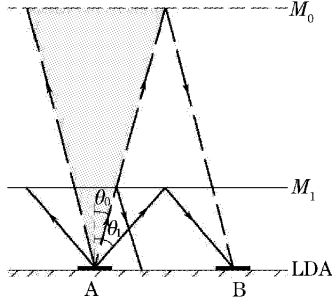


图1 外腔中两个相邻发光单元(A,B)间的光学耦合光路示意图

Fig. 1 Schematic of optical coupling between two adjacent emitters (A, B) in external cavity

现用一阶厄米-高斯光束模拟 LDA 的一阶侧模,分析高阶侧模的耦合效率。根据模式耦合理论, LDA 的第  $m$  个单元发出的光束经外腔作用耦合进第  $n$  个单元的份额为

$$C_{mn} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E_{m,b}(x,L)E_n^*(x,0)dx}{\int_{-\infty}^{\infty} E_n(x,0)E_n^*(x,0)dx}, \quad (1)$$

式中  $E_{m,b}(x,L)$  为第  $m$  个单元发出的光经外腔镜反射后回到前端面的光场,  $L$  为腔长的两倍。第  $m$  个单元(坐标为  $x_m$ )和第  $n$  个单元(坐标为  $x_n$ )前端面的光场分布分别为

$$E_{m1}(x,0) = \frac{2\sqrt{2}A_m}{\omega_m^2(0)}(x-x_m)\exp\left[-\frac{(x-x_m)^2}{\omega_m^2(0)}\right], \quad (2)$$

$$E_{n1}(x,0) = \frac{2\sqrt{2}A_n}{\omega_n^2(0)}(x-x_n)\exp\left[-\frac{(x-x_n)^2}{\omega_n^2(0)}\right], \quad (3)$$

式中  $\omega_m(0) = \omega_n(0) = \omega(0) = \sqrt{\lambda f/\pi}$ ;  $A_m, A_n$  分别是第  $m$  个和第  $n$  个发光单元所发光场的电场振幅。又由高斯光束传输规律可得

$$E_{m1,b}(x,L) = \frac{2\sqrt{2}A_m f^2 r_{ex}}{\omega_m^2(L)}(x-x_m) \times \exp\left[-\frac{(x-x_m)^2}{\omega_m^2(L)} - ik\frac{(x-x_m)^2}{2R(L)} - i\phi_1\right], \quad (4)$$

式中  $t_t$  为 LDA 前端面的透射系数,  $r_{ex}$  为外腔镜的反射系数,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $R(L) = L + f^2/L$ ,  $f = \pi\omega^2(0)/\lambda$ ,  $\phi_1 = kL - 2\arctan(L/f) + \pi$ ,  $\omega_m(L) = \omega(0)\sqrt{1+(L/f)^2}$ 。

将(2)~(4)式代入(1)式,且取  $x_m = 0, x_n = d, A_m = A_n$ ,则一阶厄米-高斯光束在相邻单元间的耦

合系数

$$C_1 = Q_1 \exp[-i(\phi_1 + 3\psi)] \times \exp\left[-\frac{(2+iL/f)d^2}{(4+L^2/f^2)\omega_0^2(0)}\right], \quad (5)$$

式中

$$Q_1 = \frac{4\sqrt{2}t_t^2 r_{ex}}{(1+L^2/f^2)^{1/4}(4+L^2/f^2)^{3/4}} \times \left[\frac{1}{2} - \frac{(2+iL/f)d^2}{(4+L^2/f^2)\omega_0^2(0)}\right], \quad (6)$$

根据实验情况,取参量  $t_t = 0.96, r_{ex} = 0.9, d = 500 \mu\text{m}, \lambda = 800 \text{ nm}, \omega_0(0) = 30 \mu\text{m}$ ,代入(5)式并取  $C_1$  的模为  $c_1$ ,得到耦合系数与腔长的关系如图 2 所示。

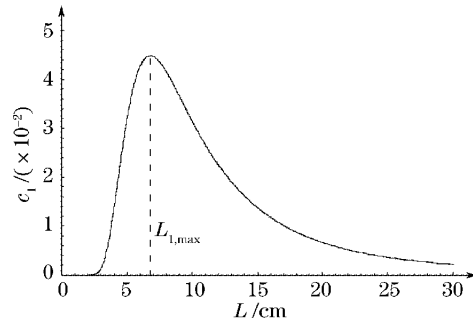


图2 一阶侧模的耦合系数幅值与腔长的关系  
Fig. 2 First order lateral mode's coupling coefficient versus external cavity length

由图 2 可以看出,当外腔长度处于  $L_{1,max}/2$  附近的一定范围内时,一阶侧模即高阶侧模在相邻单元间的耦合系数较大,较易实现锁定。由于此时腔长数值较小,这对实验中实际选择腔长来实现高阶侧模的耦合有重要的指导意义。

### 3 实验结果

实验采用德国 Osram 公司生产,型号为 SPL BX81-2S 的 LDA 芯片,它包含 19 个发光单元,每个发光单元发光区宽度  $w = 100 \mu\text{m}$ ,单元间隔  $d = 500 \mu\text{m}$ ,波长  $\lambda = 800 \text{ nm}$ 。LDA 的慢轴发散角为  $10^\circ$ ,快轴发散角为  $70^\circ$ ,将一柱透镜(LIMO 公司)置于 LDA 前端面,用以对快轴方向的光束进行准直。LDA 的最大输出功率约为 10 W。外腔反射镜的反射率为 90%。实验所测远场光强分布图是在距 LDA 前端面 1.5 m 处的横截面上用 Si 光电探头沿慢轴方向逐点扫描所得,光电探头的透光狭缝宽度控制在  $30 \mu\text{m}$  左右。

图 3(a)和(b)分别为偏置电流为 12 A,外腔长

度为 8.5 cm 和 1.0 cm 时所测得的远场光强分布。由该图可以观察到:当腔长为 8.5 cm 时,远场图上主瓣两侧未见明显的旁瓣,主瓣内包含有明显的标志锁相的峰、谷结构且调制度较高(这里,调制度定义为  $\gamma=(I_M-I_m)/(I_M+I_m)$ ,其中  $I_M$  和  $I_m$  分别为主瓣或旁瓣中的光强极大值和相邻极小值),光强主要集中在主瓣内,即基侧模在此腔长下在相邻单元

间的耦合效果较理想,达到了较好的锁定;当腔长缩短至 1.0 cm 时,远场图上出现了较为明显的主、旁瓣结构,旁瓣大致对称分布于主瓣两侧,光强依然主要分布于主瓣内,在旁瓣中同样出现了标志锁相的峰、谷结构,且旁瓣所对应的调制度高于主瓣,即当腔长缩小到一定程度时,高阶侧模在相邻单元间的耦合较基侧模更占优势,更易实现锁定。

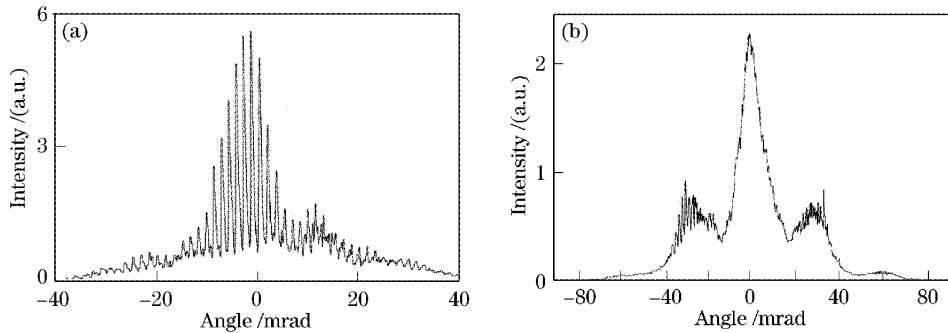


图 3 偏置电流为 12 A 时,外腔长度分别为 8.5 cm(a)和 1.0 cm(b)的情况下测得的远场光强分布  
Fig.3 Far field pattern at 12 A bias current when the external cavity length is equal to 8.5 cm (a) and 1.0 cm (b), respectively

从图 3(b)可以读出旁瓣中心处对应的远场发散角约为 26 mrad,所对应的相邻发光单元中心间距约为 0.52 mm,这与实验使用的 LDA 的实际相邻单元间距 500  $\mu\text{m}$  基本相符。该结果进一步证实,图 3(b)上的旁瓣结构是由具有较大发散角的高阶侧模在相邻单元间耦合并达到相位锁定所致。

此外,根据实验记录,当偏置电流为 12 A,LDA 不加外腔自由运行时,输出功率  $P_{\text{out}}=2.25\text{ W}$ ;当电流大小不变,对 LDA 加外腔且腔长为 1.0 cm,调节装置使高阶侧模实现锁定时,输出功率  $P'_{\text{out}}=228\text{ mW}$ 。外腔镜的透射率为 10%,在较短外腔作用下高阶侧模实现锁定时,输出功率增加并不明显,这是由于 LDA 输出光的功率主要集中在基侧模,故高阶侧模的锁定对 LDA 输出功率贡献不大。

## 4 结 论

理论预测了 LDA 高阶侧模在较短外腔作用下实现相位锁定的可能,在实验中测得了外腔长度分别为 8.5 cm 和 1.0 cm 时的远场光强分布。结果显示,当外腔较短时,在远场光强分布上,主瓣的两侧出现了包含有标志锁相的峰、谷结构的旁瓣,且其调制度明显高于主瓣中峰、谷结构的调制度。通过对实验数据的分析发现,上述现象正是由于 LDA 高阶侧模通过相邻单元间的耦合实现了相位锁定所

致,验证了理论预测的正确性,即在外腔较短情况下,LDA 高阶侧模外腔锁定的现象是存在的。

## 参 考 文 献

- Gao Songxin, Wei Bin, Lü Wenqiang *et al.*. Lifetime testing of high power diode laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6): 689~692  
高松信,魏 彬,吕文强等. 高功率二极管激光器寿命测试 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6): 689~692
- Jiang Jianping. *Semiconductor Laser* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 255  
江剑平. *半导体激光器* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 255
- Victor V. Apollonov, Sergei I. Derzhavin, Vladimir A. Filonenko *et al.*. High-power laser diode array phase locking [C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 134~146
- Yan Diyong, Tang Chun, Chen Jianguo *et al.*. Analyzing the coupling coefficients between emitters of a diode laser array phase locked in an external cavity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1): 13~16  
严地勇,唐 淳,陈建国等. 外腔锁相中二极管激光阵列发光单元间耦合系数分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(1): 13~16
- V. V. Apollonov, S. Derzhavin, V. Kislov *et al.*. Phase-locking of the 2D structures [J]. *Opt. Express*, 1998, **4**(1): 19~26
- Xin Gao, Yujin Zhen, Hirofumi Kan *et al.*. Effective suppression of beam divergence for a high-power laser diode bar by an external-cavity technique [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4): 361~363
- Feng Wang, Andreas Hermerschmidt, Hans Joachim Eichler. Narrow-bandwidth high-power output of a laser diode array with a simple external cavity [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **218**(1~3): 135~139
- M. V. Romalis. Narrowing of high power diode laser arrays using reflection feedback from an etalon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(8): 1080~1081
- Govind P. Agrawal, Niloy K. Dutta. *Semiconductor Lasers* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Cop., 1993. 49~54