

文章编号: 0258-7025(2005)07-0899-04

# 外腔锁相激光二极管阵列的一般分析

陈海波<sup>1</sup>, 陈建国<sup>1</sup>, 杨 华<sup>1</sup>, 严地勇<sup>2</sup>, 陆 丹<sup>1</sup>, 高 松<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学光电技术系, 四川 成都 610064; <sup>2</sup> 中国工程物理研究院应用电子研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 在不针对特定系统参量并考虑激光二极管阵列(LDA)前端面的剩余反射的情况下, 对外腔锁相激光二极管阵列进行了一般性分析。在只考虑相邻发光单元间互相耦合及单元自耦合的近似下, 把耦合参量表示为模和幅角的形式以便于分析各阶超模的阈值条件。对于和前端面的剩余反射系数有关的外腔锁相激光二极管阵列各阶超模的阈值, 解析证明了阈值最低的模式或为最低阶超模, 或为最高阶超模。说明了存在一些分立的外腔长度范围可以使激光二极管阵列运行于最低阶超模或者最高阶超模, 这些结果和模式耦合理论的结果一致。

**关键词** 激光技术; 激光二极管阵列; 锁相; 超模; 外腔; 耦合矩阵方程

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## General Analysis on Phase Locked External Cavity Laser Diode Arrays

CHEN Hai-bo<sup>1</sup>, CHEN Jian-guo<sup>1</sup>, YANG Hua<sup>1</sup>, YAN Di-yong<sup>2</sup>, LU Dan<sup>1</sup>, GAO Song<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> *Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*  
<sup>2</sup> *Institute of Applied Electronics, China Academic of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*)

**Abstract** Without referring to specific devices, a universal discussion has been made on the high power laser diode arrays (LDAs) phase locked with external cavities (ECs). For a phase locked LDA based on the diffraction coupling between the nearest neighbor emitters, the coupling parameters have been expressed by module and argument, and the threshold conditions for different supermodes are analyzed, including the finite reflection of the front facet of the LDA facing the EC. Even though the thresholds of the super modes of LDA are affected by the residual reflection at the front facet, it can still be analytically proved that the favored mode of the LDA is either the lowest or highest order super mode. There exist some isolated EC lengths favoring the lowest order or highest order super modes, which are in consistent with the mode coupling theory.

**Key words** laser technique; laser diode array; phase locking; super mode; external mirror; coupling matrix equation

## 1 引 言

激光二极管阵列(LDA)由于具有许多独特的优点而被广泛地应用于空间光通信、抽运固体激光器、机械加工和激光医疗等众多领域<sup>[1~3]</sup>。由于慢轴(平行于  $p-n$  结的  $x$  方向)上激光二极管阵列的模式特性较差, 人们运用了许多方法来加以改善。除了注入锁定法之外, 可以采用两类方法来锁定激光二极管阵列各单元光场的相位。一类是在制造过程中, 内建起单元间电场的耦合机制(简称“内耦合”), 以达到锁定各单元电场相位的目的<sup>[4,5]</sup>。另一类则是用外腔把从单个单元发出的光耦合到与它相邻

的发光单元中, 从而实现阵列单元之间的耦合<sup>[6~14]</sup>。在外腔锁相的情况下, 阵列单元之间的距离以及单元有源层宽度均可以大幅度地增加, 最终激光二极管阵列的功率得到明显提高。

人们已经对内耦合锁相激光二极管阵列进行了相当多的研究, 而对外腔锁相激光二极管阵列的研究则要少得多, 可以认为还没有导出完整的自治理论。此外, 外腔锁相的一个特有的问题, 即激光二极管阵列前端面(靠近外腔镜端面)的反射问题亦有待分析。目前从厂商得到的大功率激光二极管阵列的前端面的剩余反射率高达百分之几(对应的电场反

收稿日期: 2004-08-30; 收到修改稿日期: 2004-12-29

基金项目: 国家自然科学基金和中国工程物理研究院联合基金(10276026)资助项目。

作者简介: 陈海波(1980—), 男, 四川大学硕士研究生, 主要从事二极管激光器技术研究。E-mail: chemhi@sohu.com

射系数约为 0.2 左右), 这将对外腔锁相产生相当大的影响。

D. Mehuys 等<sup>[9]</sup>曾数值求解出了外腔激光二极管阵列的耦合矩阵方程, 并用塔尔伯特理论对其结果进行了说明。本文对外腔中激光二极管阵列的锁相进行了一般的分析。在只计相邻单元间耦合的条件下, 求解了一维激光二极管阵列耦合矩阵及其对应的阈值。

## 2 外腔锁相激光二极管阵列的超模和振荡模式

根据模式耦合理论, 可以求出激光二极管阵列运行所满足的耦合矩阵的本征值<sup>[10,11]</sup>

$$\beta_j = c_{mm} - 2c_{m(m\pm 1)} \cos(\theta_j), \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (1a)$$

其中  $c_{mm}$  为从一个发光单元发出的光经外腔镜反射回自身的耦合参量,  $c_{m(m\pm 1)}$  为从一个发光单元发出的光反射到与其相邻的单元的耦合参量,  $\beta_j$  为第  $j$  阶超模的本征值,  $M$  为发光单元数,  $\theta_j$  的表达式为

$$\theta_j = j\pi/(M+1), \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (1b)$$

进一步, 还可以求出运行在第  $j$  阶超模时, 激光二极管阵列前端面上的近场分布

$$\varepsilon_j(x, z=0) \propto \sum_{m=1}^M \sin(m\theta_j) E(x-x_m, 0), \quad (2)$$

对上式作傅里叶变换, 便可求出第  $j$  阶超模的远场分布。杨华等曾对由高反镜构成的简单外腔的锁相二极管阵列的远场进行了具体的分析和讨论<sup>[12]</sup>, 研究表明, (2) 式中  $E(x-x_m, 0)$  的具体形式只影响阵列远场的包络, 对本文的讨论没有实质的影响。

用模和幅角来表示耦合参量  $c_{mm}$  和  $c_{m(m\pm 1)}$ , 即

$$c_{mm} = P \exp(ip), \quad C_{m(m\pm 1)} = (Q/2) \exp(iq), \quad (3)$$

式中  $P$  和  $Q$  为正数,  $p$  和  $q$  为实数, 这四个参量与  $z$  有关而与  $x$  无关。由于  $\beta$  还可以写为<sup>[11]</sup>

$$\beta = (r_b G)^{-1} - r_t, \quad (4)$$

$$G = \exp[(\Gamma g - \alpha)l - 2i\mu k l], \quad (5)$$

利用(4)和(1a)式, 分离(5)式的虚部和实部可以得到第  $j$  阶超模的阈值条件为

$$r_b D_j \exp[(\Gamma g_j - \alpha)l] = 1, \quad (6a)$$

$$2\mu k_j l - \psi_j = 2N\pi, \quad (N \text{ 为整数}) \quad (6b)$$

式中

$$D_j = \{ [r_t + P \cos(p) - Q \cos(\theta_j) \cos(q)]^2 + [P \sin(p) - Q \cos(\theta_j) \sin(q)]^2 \}^{1/2}, \quad (7a)$$

$$\psi_j = \arctan \{ [P \sin(p) - Q \cos(\theta_j) \sin(q)] / [r_t + P \cos(p) - Q \cos(\theta_j) \cos(q)] \}, \quad (7b)$$

由式(7a)和(7b)可以确定第  $j$  阶超模的阈值增益系数和振荡波长。一般来说, 不同超模的波长略有不同。对内建耦合锁相激光二极管阵列, 这个差别小于  $10^{-10}$  m 量级<sup>[13]</sup>。陆丹等对具体参量的激光二极管阵列<sup>[10]</sup>进行了计算, 结果表明不同超模的波长差别比内建耦合锁模激光二极管阵列的还要小两个量级。考虑到介质的增益线宽要比这个波长差大几个数量级, 因此, 计算超模阈值增益的时候可以认为激光器的波长不变。

由(6a)式可以导出

$$\exp[\Gamma l(g_j - g_n)] = D_n/D_j \equiv V_{jn}, \quad (8)$$

由此可见, 如果  $V_{jn}^2$  小于 1, 那么  $g_j$  小于  $g_n$ , 第  $j$  阶超模的阈值较低, 表明第  $n$  阶超模不会是主振模。至于第  $j$  阶超模是不是主振模, 还得看  $g_j$  是否低于其他超模的阈值。为此, 先考查第  $j$  阶超模和第  $(M-j+1)$  阶超模(限定  $\theta_j \leq \pi/2$ )。由(1b)式不难看出这一对超模的  $\theta$  角之和等于  $\pi$ 。利用(7a)式可以证明, 满足  $g_j$  小于  $g_{(M-j+1)}$  的条件是

$$0 < -r_f \cos(q) - P \cos(p-q), \quad (9)$$

由于与超模阶次无关, (9)式也可以理解为  $g_1 < g_M$  的条件。

下面进一步证明, 如果第 1 阶(即基阶)超模阈值低于第  $M$  阶(即最高阶)超模的阈值(即(9)式成立)的话, 那么  $g_1$  低于任何其他阶超模的阈值。利用(7a)和(8)式, 可以证明  $g_1 < g_j$  的条件是

$$0 < Q[\cos(\theta_1) + \cos(\theta_j)] - 2r_t \cos(q) - 2P \cos(p-q), \quad (10)$$

由(1b)式知, 上式第一项不小于零, 考虑(9)式后可知道(10)式是成立的。由此证明: 如果基超模的阈值增益低于最高阶超模的阈值增益的话, 那么基超模的阈值也会低于其他各阶超模。类似地, 也可以证明如果最高阶超模的阈值低于基超模的话, 那么最高阶超模的阈值最低, 此时(9)式的小于号将换成大于号。证明了要么是基超模阈值最低, 要么最高阶超模阈值最低。这与前人实验结果一致<sup>[9,15]</sup>, J. R. Leger 对此也给出了相应的物理说明<sup>[15]</sup>。

## 3 外腔长度对模式的选择

在实践中, 人们既观察到了基超模也测到了最高阶超模。D. Mehuys 等<sup>[9]</sup>的数值计算证实了腔长对超模有一定的选择作用。在分析中, 前人引入

了塔尔博特距离的概念,阵列的塔尔博特距离为  $z_t$  等于  $(2d^2/\lambda)$ 。按照 D. Mehuys 等<sup>[9]</sup> 的计算:当  $L/z_t \approx 0.5$  时,最高阶超模阈值最低;  $L/z_t \approx 1$  时,基超模和高阶超模的阈值相同。然而 V. V. Apollonov 等<sup>[6]</sup> 的实验则表明,  $(L/z_t)$  取值在 0.2 ~ 0.6 的范围内时,外腔锁相激光二极管阵列可以运行在不同的超模。在假设发光单元近场为高斯函数的情况下,陆丹等<sup>[11]</sup> 求得了具体的耦合系数,并以此对外腔激光二极管阵列的超模进行了具体的分析和计算,也证实了外腔长度对模式有选择作用。

对于腔长的选模作用,可以作如下考虑。相位参量  $p$  主要包括光线在腔内往返的相移  $(2\pi L/\lambda)$ , 其次是共振腔结构带来的附加因子以及外腔反射镜带来的反射相移;而参量  $q$  则要多出一项,它对应从某个单元发出的并经反射后入射到相邻单元的光线的相移,因而粗略地说应该多出一项  $k'd$ , 且不难证明它等于  $kd^2/L$ 。以这根光线来估计, (9) 式可化为

$$0 \leq -r_f \cos(q) - P \cos(kd^2/L) = r_f \cos(q) - P \cos(\pi z_t/L), \quad (11)$$

上式第一项随  $L$  的改变而在  $-r_f$  和  $r_f$  间快速振荡, 后一项则是  $L$  的慢变函数;在  $L$  大于  $2z_t$  的情况下, 第二项始终为负。如果激光二极管阵列的端面反射系数  $r_f$  足够小的话, 只要  $L$  比  $2z_t$  稍大一点, (11) 式始终不能成立, 即激光二极管阵列阈值最低的模式始终是最高阶超模。(11) 式表明, 基超模使阈值最低所需要的外腔长度应满足

$$\frac{z_t}{(2n+1) + \arccos(r_f/P)/\pi} \leq L \leq \frac{z_t}{(2n+1) - \arccos(r_f/P)/\pi}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (12a)$$

类似地, 要使最高阶模阈值最低所需要的外腔长度应满足

$$\frac{z_t}{2(n+1) + \arccos(r_f/P)/\pi} \leq L \leq \frac{z_t}{2(n+1) - \arccos(r_f/P)/\pi}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (12b)$$

需要说明的是, (12) 式只适用于激光二极管阵列前端面反射系数  $r_f$  小于  $P$  的情况。事实上, 如果  $r_f$  大于  $P$  的话, 激光二极管阵列自身应该是一个激光器, 外腔的作用已退居次要地位。此时, 激光器的特性应该主要由  $r_f$  来决定, 外腔能否实现锁相有待进一步研究。图 1 给出了在  $\arccos(r_f/P) = 0.3\pi$  的情况下, 要使最低阶或最高阶超模阈值最低时对应的外腔长度

范围, 字母  $H$  和  $L$  分别代表使最高阶和最低阶超模阈值最低时的腔长范围,  $U$  代表不能确定两者谁最低的范围。需要补充说明的是, 首先, 上边的分析只考虑了从发光中心发出, 经反射后到达邻近单元中心的那一根光线。按照模式理论, 从某一单元发出的光可以看成是在  $x$  方向具有不同波矢分量  $k'$  的平面波的叠加, 不是所有被外腔镜反射到相邻单元的光线所经历的附加相移都等于  $kd^2/L$ 。事实上, 可以经反射并耦合到相邻单元的光线的波矢在  $x$  方向的分量  $k'$  是分布在某一个范围内的, 因而参量  $q$  应该是对该范围内光线积分的结果。对于参量  $p$  也可以做类似的分析。其次, 参量  $P$  是与  $L$  有关的, 一般来说  $L$  越大  $P$  越小, 这会使 (12) 式中的反余弦项随之改变。当  $L$  大到一定程度后,  $P$  还可能会变得小于  $r_f$ , 上边的讨论也就不再适用了。第三, 也许还有一些影响反射场与出射场相位关系的次要因素未曾考虑。因此, 上边的讨论只是一种定性分析, 结论应该是: 当激光二极管阵列前端面反射率足够小时, 存在一些分立的区间范围, 当外腔往返长度落在这些范围内时, 基超模或最高阶超模的阈值最低。此外, 在推导 (12) 式时是根据  $-P \cos(\pi z_t/L)$  大于  $r_f$  来确定外腔长度范围的, 这是比较保险的做法。其实,  $r_f \cos(q)$  还可以为负数, 因而在标有“U”的区域中还存在一些明显小于激光波长的长度范围支持基超模或高阶超模, 只不过此时激光器对腔长度的漂移十分灵敏, 即使是若干分之一个波长的外腔长度扰动, 都有可能使激光二极管阵列最低阈值模式变为最高阶超模或反之。

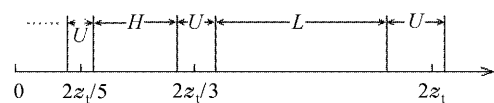


图 1 支持最高阶和最低阶超模的外腔往返长度范围  
Fig. 1 Round trip external cavity length ranges favoring the highest order and lowest order super modes

## 4 结 论

在不涉及具体外腔器件参量的情况下, 对外腔锁相激光二极管阵列进行了一般性的分析。在只计相邻发光单元间互相耦合及单元自耦合的条件下, 证明了外腔锁相激光二极管阵列阈值最低的模只能是基超模或最高阶超模, 证明了存在一些分立的外腔长度范围可以使激光二极管阵列运行于基超模或者最高阶超模。对于塔尔博特距离为  $z_t(2d^2/\lambda)$  的外腔激光二极管阵列来说, 当腔长在  $z_t/(4n+3)$  和

$z_i/(4n+1)$  之间时(其中  $n=0,1,2,\dots$ ),阵列运行于基超模下,当腔长在  $z_i/(4n+5)$  和  $z_i/(4n+3)$  之间时,阵列运行于最高阶超模下。

### 参 考 文 献

- Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng yi *et al.*. High power diode-end-pumped Nd: YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):19~21  
张红瑞,高明义,郑 义等. 大功率激光二极管端面抽运的 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(1):19~21
- Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang *et al.*. Study on uniform of pump distributivity in a LD side-pumped Nd: YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):390~394  
宁继平,蔡志强,陈志强等. LD 侧面抽运的 Nd: YAG 激光器抽运均匀性研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(4):390~394
- Lin Bin, Zeng Xiaodong, An Yuying *et al.*. Analysis on the laser diode-multimode fiber coupling efficiency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10):1200~1203  
林 彬,曾晓东,安毓英等. 大功率激光二极管与多模光纤耦合效率分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(10):1200~1203
- D. Botez, D. Scifres. Diode Laser Arrays [M]. Cambridge: U. K., Cambridge University Press, 1994. 1~72
- Dan Botez, Luke J. Mawst. Phase-locked laser arrays revisited [J]. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 1996, **12**:25~32
- V. V. Apollonov, S. I. Derzhavin, V. I. Kislov *et al.*. Spatial phase locking of linear arrays of 4 and 12 wide-aperture semiconductor laser diodes in an external cavity [J]. *Quantum Electron.*, 1998, **28**(3):257~263
- Feng Wang, Andress Hermerschmidt, Hans Joachim Eichler. Narrow-bandwidth high-power output of a laser diode array with a simple external cavity [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **218**: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):1080~1082
- D. Mehuys, K. Mitsunaga, L. Eng *et al.*. Supermode control in diffraction-coupled semiconductor laser arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(13):1165~1167
- Lu Dan, Gao Song, Chen Jianguo *et al.*. Threshold analysis of super-modes of a diode laser array phase-locked in an external cavity [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(2):14~16  
陆 丹,高 松,陈建国等. 外腔锁相二极管激光阵列超模的阈值分析[J]. 激光杂志, 2004, **25**(2):14~16
- Lu Dan, Yan Diyong, Chen Jianguo *et al.*. Super mode of diode-laser arrays phase-locked in an external cavity [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9):1119~1122  
陆 丹,严地勇,陈建国等. 外腔锁相二极管激光器阵列的超模[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(9):1119~1122
- Hua Yang, Jianguo Chen, Diyong Yan *et al.*. Analytical characterizing far field pattern of super-modes from external cavity phase locked diode array [J]. *Opt. Commun.*, (to be published)
- J. K. Butler, D. E. Ackley, D. Botez. Coupled-mode analysis of phase-locked injection laser arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(3):293~295
- Xin Gao, Yujin Zheng, 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
- James R. Leger. Lateral mode control of an AlGaAs laser array in a Talbot cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(4):334~336