

# 光电负反馈下单向耦合注入垂直腔表面发射激光器的混沌同步特性研究<sup>\*</sup>

王小发 夏光琼 吴正茂<sup>†</sup>

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2008 年 10 月 6 日收到, 2008 年 11 月 17 日收到修改稿)

基于自旋反转模型(SFM)对光电负反馈下单向耦合注入垂直腔表面发射激光器(VCSEL)的混沌同步特性进行了数值仿真和理论分析. 研究表明, 随着反馈强度的增加, 激光器输出功率呈现两个不同的混沌区域. 在单一偏振模区域, 能实现很好的同步性, 但接近两模共存时, 同步质量急剧下降; 在两模共存区域, 偏振模的连续性差, 同步质量不理想. 两模共存时的同步质量比单一偏振模差的这一特性, 与已报道的基于光反馈的情景相反. 产生这一特殊现象的原因是光电负反馈诱发了偏振模竞争效应. 此外, 还发现内部参数的变化对两个混沌区域的选取有较大影响.

关键词: 线性偏振模, 光电负反馈, 垂直腔表面发射激光器(VCSEL), 混沌同步

PACC: 4260B, 4265T

## 1. 引 言

近年来, 垂直腔表面发射激光器(VCSEL)因其具有低阈值电流、易于实现单纵模光输出、大的调制带宽、容易与光纤耦合、易集成而形成激光阵列、制作成本低廉等优势, 有望取代常规边发射半导体激光器(EEL)而成为光通信和光信号处理的关键器件, 因而备受关注. 由于 VCSEL 的增益介质晶体有很弱的各向异性, 这会导致明显的横磁(TM)模线性偏振的产生, VCSEL 的偏振特性一直是人们关注的焦点. 1995 年, Miguel 等人提出了自旋反转模型(SFM), 该模型能很好地描述 VCSEL 输出的偏振特性<sup>[1]</sup>.

近些年来, 激光混沌通信由于具有较大的带宽、较低的衰减、动力学系统比较复杂等优点从而受到人们的广泛关注<sup>[2-23]</sup>, 其中已经有相当一部分相关研究工作集中在 VCSEL<sup>[7-15]</sup>上. Rui 等人已经理论研究了开环和闭环两种情况下偏振矢量混沌同步特性<sup>[10]</sup>; Hong 等人实验研究了单向耦合注入 VCSEL 偏振矢量混沌同步特性<sup>[11, 12]</sup>; 钟东洲等人理论研究

了基于光反馈的单向耦合注入 VCSEL 的矢量混沌同步特性<sup>[13, 14]</sup>. 最近, Ignace 等人又深入研究了偏振模竞争对单向耦合注入下 VCSEL 混沌同步特性的影响<sup>[15]</sup>. 目前人们对基于外部光反馈的 VCSEL 混沌同步系统的研究已经比较深入. 但是由于基于外部光反馈的混沌通信系统对相位非常敏感, 因此实验对外腔长度的稳定性要求非常苛刻. 而基于光电负反馈的激光混沌同步系统由于对相位不敏感以及电控操作方便的特点, 相对而言易于实验实现, 并已在 EEL 中得到广泛应用和较深入的研究<sup>[18-21]</sup>. 从目前来看, 尽管人们对基于光电负反馈的 VCSEL 系统已开展了一些研究<sup>[16]</sup>, 但对基于光电负反馈的 VCSEL 混沌同步系统的研究尚不多见. 基于此, 本文基于 SFM 模型, 对光电负反馈下单向耦合注入 VCSEL 的混沌同步特性进行了数值仿真和相关理论分析, 并得到了一些新结果.

## 2. 系统模型

图 1 为基于光电负反馈下单向耦合注入 VCSEL 混沌同步系统模型. 主激光器和外部光电反馈系统

<sup>\*</sup> 重庆市自然科学基金(批准号: CSTC 2007BB2333)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

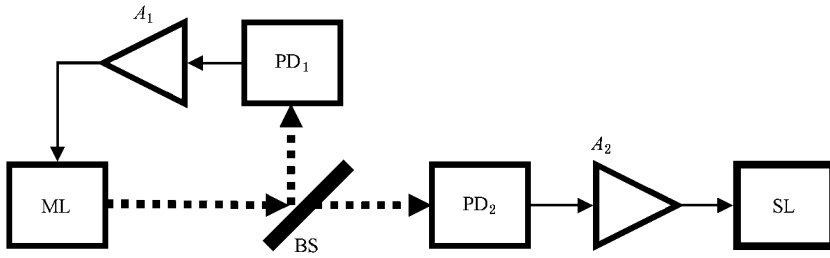


图 1 光电负反馈的单向耦合注入 VCSEL 混沌同步系统模型( ML 为主 VCSEL ,SL 为副 VCSEL ;BS 为分束器 ;PD 为光电探测器 ;A 为宽带放大器)

构成发射系统.主激光器( ML)发出的光通过分束器分成两部分,一部分经光电探测器 I( PD<sub>1</sub>)和宽带放大器 I( A<sub>1</sub>)后反馈回 ML 使其产生混沌输出;另一部分经光电探测器 II( PD<sub>2</sub>)和宽带放大器 II( A<sub>2</sub>)后,注入到副激光器( SL).模型中的虚线表示光信号传输,实线表示电信号传输.

### 3. 理 论

根据自旋反转模型<sup>[1]</sup>,描述基于光电负反馈下主-副 VCSEL 构架下系统工作特性的速率方程组为<sup>[16]</sup>

$$\frac{dE_{x,y}^{m,s}}{dt} = k(1 + i\alpha) \{ NE_{x,y}^{m,s} - E_{x,y}^{m,s} \pm in^{m,s} E_{y,x}^{m,s} \} \mp (\gamma_a + i\gamma_p) E_{x,y}^{m,s}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN^{m,s}}{dt} = & -\gamma_e N^{m,s}(1 + P^{m,s}) \\ & + \gamma_e \mu \left[ 1 - \eta^{m,s} \frac{P^{m,s}(t - \tau^{m,s})}{P_0^{m,s}} \right] \\ & - i\gamma_e n^{m,s} (E_y^{m,s} E_x^{m,s*} - E_x^{m,s} E_y^{m,s*}), \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dn^{m,s}}{dt} = & -\gamma_s n^{m,s} - \gamma_e n^{m,s} P^{m,s} \\ & - i\gamma_e N^{m,s} (E_y^{m,s} E_x^{m,s*} - E_x^{m,s} E_y^{m,s*}), \quad (3) \end{aligned}$$

$$P^{m,s} = |E_x^{m,s}|^2 + |E_y^{m,s}|^2, \quad (4)$$

其中,上标 m 和 s 分别表示主、副激光器, E<sub>x</sub> 和 E<sub>y</sub> 表示光场两线性偏振模的慢变振幅, N 为总的载流子密度, n 表示两个自旋反转载流子密度的差值, k 代表光场衰减率, γ<sub>e</sub> 为总的载流子衰减率, α 是线宽增强因子, γ<sub>s</sub> 为自旋反转速率, γ<sub>a</sub> 代表线性色散效应, γ<sub>p</sub> 代表有源介质线性双折射效应, τ<sup>m</sup> 是外腔反馈延迟时间, τ<sup>s</sup> 主激光器到副激光器的传输时间, η<sup>m</sup> 为主激光器的反馈系数, η<sup>s</sup> 为副激光器的注入系数, μ 为对阈值电流进行归一化后的注入电流, p 为归一化的输出功率, p<sub>0</sub> 是激光器自由运行时的输出功率.为简便起见,我们忽略了随机噪声的影响.

对于完全同步,主-副激光器之间的速率方程完全等同,需要满足如下条件:

$$\begin{aligned} I_{x,y}^s(t) &= I_{x,y}^m(t - \tau^s + \tau^m), \\ N^s(t) &= N^m(t - \tau^s + \tau^m), \\ n^s(t) &= n^m(t - \tau^s + \tau^m), \\ \eta^m &= \eta^s, \end{aligned}$$

其中, I<sub>x,y</sub><sup>m,s</sup> = |E<sub>x,y</sub><sup>m,s</sup>|<sup>2</sup>. 当 τ<sup>m</sup> = τ<sup>s</sup> 时,主-副激光器之间可实现无时间滞后的完全同步.

### 4. 结果与讨论

引入相关函数来描述激光器之间的同步程度,相关函数的定义如下<sup>[17]</sup>:

$$C_{x,y}(\Delta t) = \frac{[I_{x,y}^m(t) - I_{x,y}^m(t - \Delta t)] [I_{x,y}^s(t - \Delta t) - I_{x,y}^s(t - \Delta t)]}{|I_{x,y}^m(t) - I_{x,y}^m(t - \Delta t)|^{1/2} |I_{x,y}^s(t - \Delta t) - I_{x,y}^s(t - \Delta t)|^{1/2}}, \quad (5)$$

这里 Δt 为时延,表示对时间取平均, C<sub>x,y</sub>(Δt) 表示主-副激光器之间两线性偏振模相关函数的时间序列. C 值越大,同步质量越高; C 值为 1 时,表示系

统完全同步.

利用四阶龙格库塔方法对(1)–(5)式进行求解,数值模拟所用的参数取值如下: α = 3, k = 300

$\text{ns}^{-1}$ ,  $\tau^s = \tau^m = 5 \text{ ns}$ ,  $\gamma_e = 1 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_s = 10 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_a = 0.5 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 20 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\mu = 1.27^{[16]}$ .

主激光器输出的偏振模动态特性如图2所示. 随着光电负反馈强度的增加, 输出功率的混沌区域被分成两个:A区和B区, 类似的结果已有报道<sup>[16]</sup>.

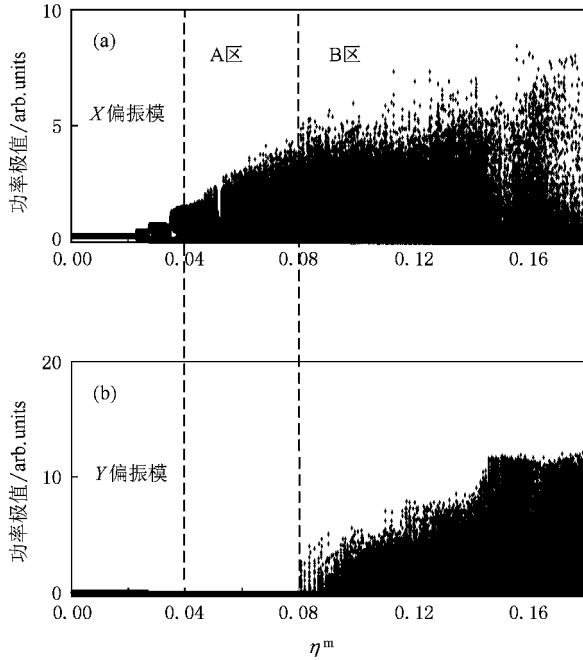


图2 主激光器输出功率极值随反馈强度变化的分岔图

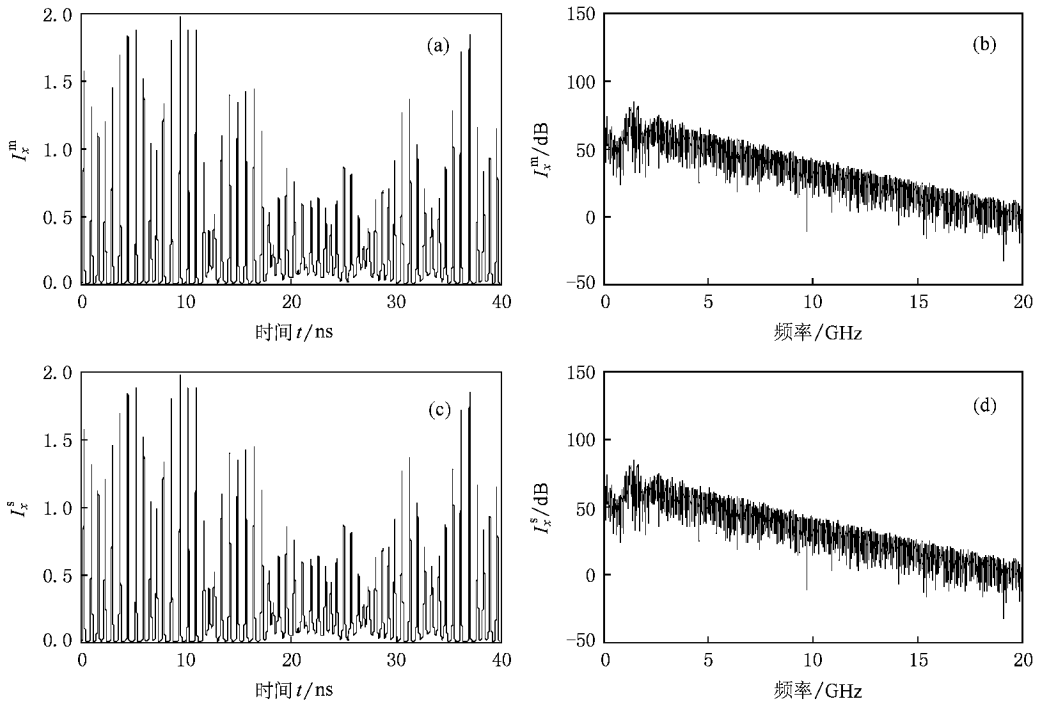


图3 当  $\eta = \eta^m = \eta^s = 0.06$  时,  $x$  偏振模的时间序列和功率谱

其中,A区为单一  $x$  偏振模区域,混沌特性相对稳定,B区是两线性偏振模共存区域,偏振模竞争非常厉害,混沌特性不稳定,在某些反馈强度下,会出现一个线性偏振模主导的情形,基于此,我们只选择混沌态趋于连续的区域进行研究.

#### 4.1. A区同步特性

在A区,当  $\eta = \eta^m = \eta^s = 0.06$  时,主-副激光器之间,  $x$  偏振模能实现无时间滞后的完全同步.图3给出了相应的时间序列和功率谱.从图中可以看出,两激光器之间,时间序列和功率谱完全一致.图4给出了  $x$  偏振模的相关系数随时延的变化关系.当  $\Delta t = 0$  时,  $C_x$  达到1.由此可见,在A区,可以实现很好的完全同步.

为了更好地了解A区的完全同步特性,有必要考虑相关系数随  $\eta$  的变化规律.图5给出了当  $\eta = \eta^m = \eta^s$  时,  $x$  偏振模相关系数随  $\eta$  的变化规律图.从图中可以看出,在  $\eta < 0.07$  的范围内,  $x$  偏振模的完全同步系数达到1.随着反馈系数的增加,同步性能逐渐下降,越接近两模共存区域,同步效果越差,出现这种现象的原因是由于光电负反馈诱发了激光器内部的偏振模竞争效应.

#### 4.2. B区同步特性

从图2中可以看出,B区为两偏振模共存区域.

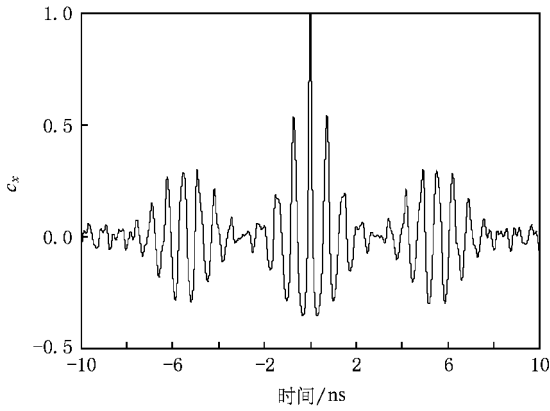


图 4 当  $\eta = \eta^m = \eta^s = 0.06$  时,  $x$  偏振模的相关系数随时延的变化关系

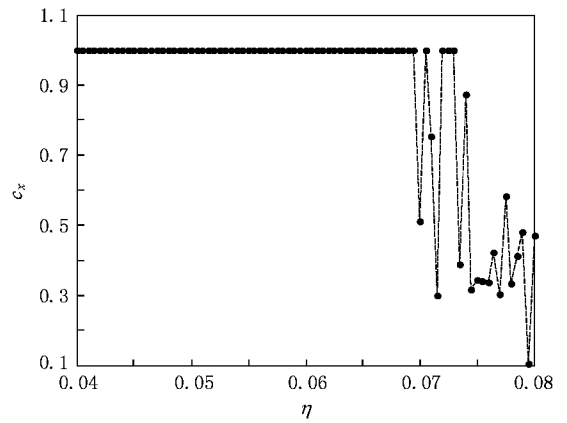


图 5 当  $\eta = \eta^m = \eta^s$  时,  $x$  偏振模相关系数随  $\eta$  的变化规律

然而,由于光电负反馈诱发的偏振模竞争效应,这个混沌区域相当不稳定.选择合适的参数,当  $\eta = \eta^m = \eta^s = 0.13$  时,两偏振模的时间序列和功率谱如图 6 所示.从图中可以看出,虽然主-副激光器之间两偏振模的功率谱很相似,但是时间序列相差很大,同步效果非常差,两偏振模的完全同步系数分别为  $C_x = 0.2948$  和  $C_y = 0.2534$ .

为了更好地了解 B 区的完全同步特性,在  $\eta = \eta^m = \eta^s$  的情况下,图 7 给出了主-副激光器之间两偏振模的相关系数随  $\eta$  变化规律图.其中,图 7(a)

表示  $x$  偏振模在  $(0.08, 0.14)$  (由于图 2 中,在  $\eta^m > 0.15$  的范围内,  $x$  偏振模连续性差,故不考虑)这个连续混沌态范围内的完全同步系数.从图中可以看出,  $C_x$  的最大值出现在  $\eta = 0.085$  处,但只有 0.6 左右,整个区域内完全同步性都很差.图 7(b)表示  $y$  偏振模在  $(0.1, 0.18)$  (由于图 2 中,在  $0.08 < \eta^m < 0.10$  这个范围内,  $y$  偏振模连续性很差,故不考虑)这个连续混沌态范围内的完全同步系数.从图中可以看出,  $y$  偏振模的同步系数也普遍较差,  $C_y$  最大值出现在  $\eta = 0.161$  处,也只有 0.6.在整个 B 区,不管是  $x$  偏振模还是  $y$  偏振模,都很难实现好的完全

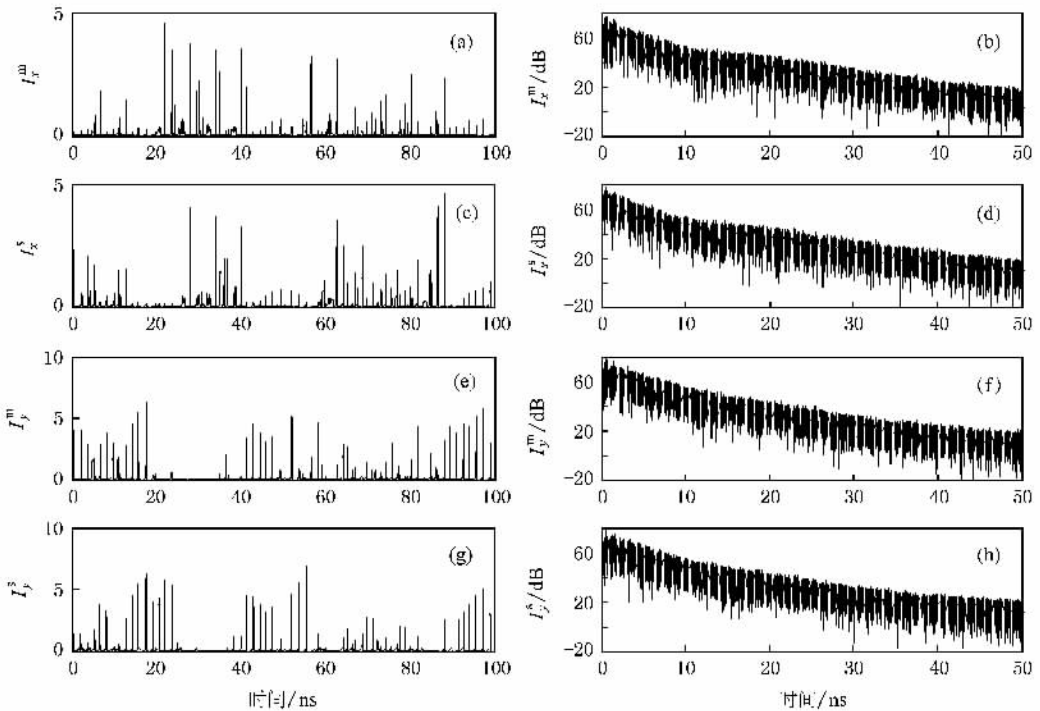


图 6  $x$  偏振模和  $y$  偏振模的时间序列和功率谱

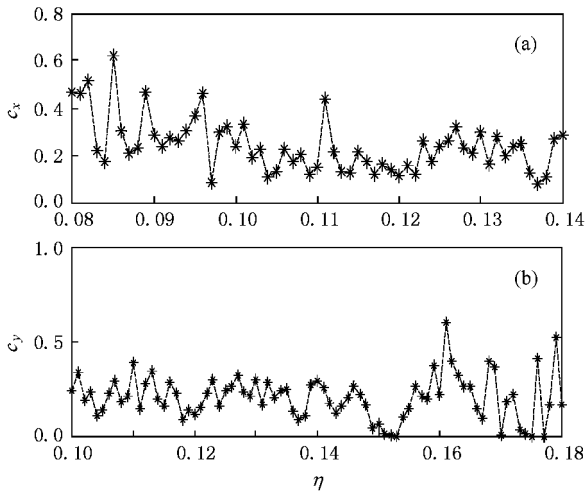


图7 当  $\eta = \eta^m = \eta^s$  时,  $x$  偏振模和  $y$  偏振模相关系数随  $\eta$  的变化规律

同步.

归结起来,在光电负反馈的条件下,两模共存区域的同步性要比单一偏振模区域差,这点与已经报道的基于光反馈的 VCSEL 混沌同步特性恰好相反<sup>[15]</sup>.导致出现这一现象的原因是在文献[15]中的光反馈混沌系统中,单一偏振模混沌区域和两模共存混沌区域是通过改变初始参数来实现的,所取  $\gamma_p = 6 \text{ ns}^{-1}$  很小,但随着  $\gamma_p$  的增加,两模会逐渐过渡到一个模式,且同步质量变差,这点已在文献[15]中得到体现.而在光电负反馈中,两个不同的混沌区域是随着反馈强度的增加而产生的.反馈强度的增加相当于减少了 VCSEL 的运行电流,而当运行电流减少至开关电流( $\mu = 1.05$ )附近<sup>[16]</sup>或越过开关电流时,会诱发 VCSEL 内部复杂的偏振模竞争效应,这样就会导致上述 B 区混沌特性的不稳定性,总的变化趋势是:  $x$  偏振模逐渐减弱,  $y$  偏振模逐渐增强,这与其偏振开关特性符合.此外,还发现无论  $\gamma_p$  的取值如何, B 区的混沌同步质量始终很差.

#### 4.3. $\gamma_p$ 参量对两个混沌区域的影响

上面所述的两个混沌区域的产生,除依赖初始值的选择以外,还与  $\gamma_p$  因子的选取有关.只有选择

合适的  $\gamma_p$ , 激光器输出功率才能呈现上面所述的两模共存区域.图8给出了当  $\eta^m = 0.13$  时,主激光器输出功率极值关于  $\gamma_p$  的分岔图.从图中可以看出,  $\gamma_p$  在  $(4.5 \text{ ns}^{-1}, 34 \text{ ns}^{-1})$  之间取值时,激光器输出功率才可能出现两模共存区域,且  $\gamma_p$  的值越大,这个区域越不稳定.

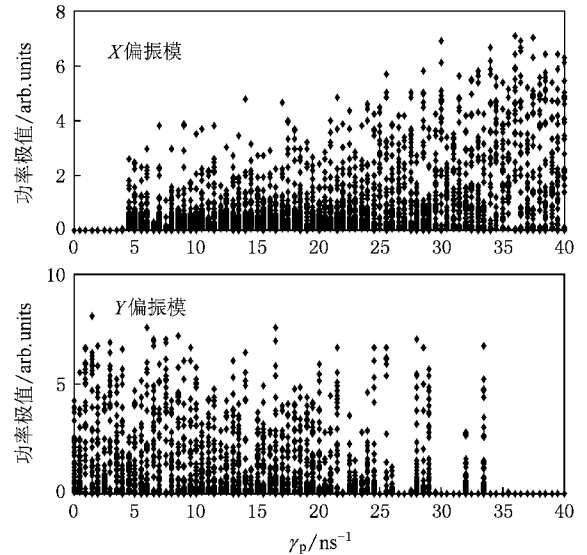


图8 当  $\eta^m = 0.13$  时,主激光器输出功率极值关于  $\gamma_p$  的分岔图

## 5. 结 论

基于 SFM 模型,本文对光电负反馈下主-副结构的 VCSEL 混沌同步系统的同步特性进行了理论研究.研究表明:随着反馈强度的增加,激光器输出功率呈现两个不同的混沌区域,分别称为 A 区和 B 区. A 区只含  $x$  偏振模, B 区为  $x$  偏振模和  $y$  偏振模共存区域.在 A 区,  $x$  偏振模能实现很好的完全同步性,但接近两模共存时,同步质量急剧下降;在 B 区,两偏振模共存区域的同步质量始终很差.这点与已报道的基于光反馈的情景相反,导致这一现象出现的原因是光电负反馈诱发了 VCSEL 内部复杂的偏振模竞争效应.此外,还发现  $\gamma_p$  对两个混沌区域的选择有较大影响.

[1] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728

[2] Zhu S, Fang J, Luo X 2002 *Eur. Phys. J. D* **18** 123

[3] Zhu S Q, Li X, Zhou J L 2001 *Chin. J. Lasers* **28** 343 (in Chinese)[朱士群、吕翔、周建兰 2001 中国激光 **28** 343]

- [ 4 ] Wu L , Zhu S Q 2003 *Phys. Lett. A* **308** 157  
 [ 5 ] Wu L , Zhu S Q , Li J 2006 *Physica D* **223** 208  
 [ 6 ] Wang Y C , Li Y L , Wang A B , Wang B J , Zhang G W , Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4686 ( in Chinese ) [ 王云才、李艳丽、王安帮、王冰洁、张耕玮、郭 萍 2007 物理学报 **56** 4686 ]  
 [ 7 ] Hong Y H , Rui J , Spencer P S , Shore K A 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 619  
 [ 8 ] Paul J , Masoller C , Hong Y H , Spencer P S , Shore K A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 1987  
 [ 9 ] Regalado J M , Prati F , Miguel M S , Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765  
 [ 10 ] Ju R , Spencer P S , Shore K A 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 1461  
 [ 11 ] Hong Y H , Lee M W , Spencer P S , Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 1215  
 [ 12 ] Hong Y H , Lee M W , Spencer P S , Shore K A 2008 *Opt. Lett.* **33** 587  
 [ 13 ] Zhong D Z , Xia G Q , Wang F , Wu Z M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3279 ( in Chinese ) [ 钟东洲、夏光琼、王 飞、吴正茂 2007 物理学报 **56** 3279 ]  
 [ 14 ] Zhong D Z , Xia G Q , Wu Z M , Jia X H 2008 *Opt. Commun.* **281** 1698  
 [ 15 ] Ignace G , Marc S , Alexandre L , Krassimir P 2007 *Opt. Lett.* **32** 1629  
 [ 16 ] Zhong W L , Luo B , Li X F , Zuo X H , Wang M Y 2007 *Appl. Opt.* **46** 7262  
 [ 17 ] Li X F , Pan W , Ma D , Luo B , Zhang W L , Xiong Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5094 ( in Chinese ) [ 李孝峰、潘 炜、马 冬、罗 斌、张伟利、熊 悦 2006 物理学报 **55** 5094 ]  
 [ 18 ] Tang S , Liu J M 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 329  
 [ 19 ] Lin F Y , Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **221** 173  
 [ 20 ] Lin F Y , Liu J M 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 562  
 [ 21 ] Liao J F , Xia G Q , Wu J G , Xu L , Wu Z M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6301 ( in Chinese ) [ 廖健飞、夏光琼、吴加贵、许 黎、吴正茂 2007 物理学报 **56** 6301 ]  
 [ 22 ] Uchida A , Higa K , Shiba T , Yoshimori S , Kuwashima F , Iwasawa H 2003 *Phys. Rev. E* **68** 016215  
 [ 23 ] Zhang F , Chu P L 2004 *Opt. Commun.* **237** 213

## Chaotic synchronization performances of two unidirectionally coupled VCSELs subject to negative optoelectronic feedback<sup>\*</sup>

Wang Xiao-Fa Xia Guang-Qiong Wu Zheng-Mao<sup>†</sup>

( School of Physics , Southwest University , Chongqing 400715 , China )

( Received 6 October 2008 ; revised manuscript received 17 November 2008 )

### Abstract

Based on the framework of the spin-flip model ( SFM ), the synchronization performance of two unidirectionally coupled vertical-cavity surface emitting lasers ( VCSELs ) subject to negative optoelectronic feedback has been theoretically investigated. The results show that , with the increase of the feedback intensity , the laser output power displays two different chaos regions , i. e. , singles-polarization mode region and mixed mode region. The polarized mode in the single mode region can achieve good synchronization , but sharply decline in the quality of synchronization close to the mixed mode region. Within the mixed-mode region , the continuity and quality of synchronization of polarized modes are not ideal. The fact that the synchronization quality of the mixed mode is worse than that of the single mode , is on the contrary to reported results based on optical feedback. The reason may be due to that negative optoelectronic feedback has induced the competition between the polarized modes. In addition , we have found changes in internal parameters have a great impact on the selection of two chaotic regions.

**Keywords** : linear polarization mode , negative optoelectronic feedback , vertical-cavity surface-emitting laser ( VCSEL ) , chaotic synchronization

**PACC** : 4260B , 4265T

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing City , China ( Grant No. CSTC 2007BB2333 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : zmwu@swu.edu.cn