

基于光反馈的单向耦合注入垂直腔表面发射激光器的矢量混沌同步特性研究^{*}

钟东洲^{1)†} 夏光琼²⁾ 王 飞³⁾ 吴正茂²⁾

1) 五邑大学信息学院, 江门 529020)

2) 西南大学物理学院, 重庆 400715)

3) 重庆工学院数理学院, 重庆 400050)

(2006 年 7 月 28 日收到, 2006 年 10 月 28 日收到修改稿)

基于自旋反向模型(SFM), 数值研究了基于光反馈的单向耦合注入垂直腔表面发射激光器的矢量混沌同步特性. 研究结果表明: 当外部光反馈时间等于光从发射系统到接收系统传输时间时, $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模都能接收最好的完全混沌同步质量. 若外部光反馈时间不等于传输时间且注入电流接近阈值电流时, 占主导的 $\hat{y}$ 偏振模能暂时实现较好的完全混沌同步质量. 相比较而言, 占主导地位的 $\hat{x}$ 偏振模至始至终获得很差的同步质量. 另外, 当系统输出为混合偏振模时, 混合偏振模中的每一个线性偏振模获得很差完全同步质量. 然而, 当注入电流远大于阈值电流时, 系统输出仅为 $\hat{y}$ 偏振模, 这时 $\hat{y}$ 偏振模能稳定地实现最好的完全混沌同步质量. 最后, 当接收激光器受到线性偏振模的强注入时, 每一个注入线性偏振模能与接收激光器输出的对应的线性偏振模实现很好的注入锁定同步. 然而, 每一个占主导的线性偏振模比另一被抑制的线性偏振模获得更差注入锁定同步质量. 如果有相等的能量的两个线性偏振模同时存在, 这两个线性偏振模获得差不多一致的注入锁定混沌同步质量, 换句话说, 能量较少的线性偏振模能获得较高的注入锁定同步质量.

关键词: 线性偏振态, 垂直腔表面发射激光器, 完全矢量混沌同步, 强注入锁定矢量混沌同步

PACC: 4265T, A260B

1. 引言

近年来, 由于光反馈激光器的光保密通信系统结构简单, 且能产生高维和频带宽的混沌载波, 所以基于半导体激光器的混沌同步在保密通信中的潜在的应用被广泛的研究^[1-16], 而由一个光反馈的常规边缘发射半导体激光器(发射系统)和一个受到来自发射系统的光注入的常规边缘发射半导体激光器(接受系统)构成的系统常应用于光混沌保密通信系统. 在这个系统中, 接收激光器只受到来自发射激光器输出的光单向耦合注入, 而发射激光器只受到来自平面镜的光反馈注入, 而不会受到来自接收激光器输出的光注入. 这个保密系统称之为基于光反馈的单向耦合注入半导体激光器保密通信系统, 该系统引起了人们极大的兴趣^[4-16], 因为这种结构相对

简单且容易实现.

然而, 垂直腔表面发射激光器(VCSEL)是光通信系统和光信号处理的关键器件, 它比常规边缘发射半导体激光器(EEL)更具有如下优点: 单纵模光输出、低阈值电流、大的调制带宽、圆形光束输出、容易与光纤耦合、且易集成而形成激光阵列. 由于常规边缘发射半导体激光器激光腔结构的非对称性, 所以激光腔的增益介质晶体有很强的各向异性, 所以它输出的横电(TE)模线性偏振锁定到一个固定轴上. 相比之下, 若激光器的激光腔通常被设计为匀称的结构, 它的增益介质晶体有很弱的各向异性, 这会导致横磁(TM)模的线性偏振的产生. 因为 VCSEL 的激光腔为匀称的圆柱形, 且体积小, 所以它对这种现象尤为明显. 1995 年, San 等人提出了一个具有四能级量子阱的 VCSEL, 简称为自旋反向模型(SFM)^[17], 该模型很好描述了 VCSEL 的输出的偏振态特性.

^{*} 重庆市自然科学基金(批准号: 2006BB2331, 2005BB3099)资助的课题.

[†] E-mail: dream_yu2002@126.com

SFM 模型指出 VCSEL 输出的偏振态取决于如下两方面^[17]:首先,偏振态取向性反映了不同光子跃迁的本质的动力学行为.另一方面,激光腔的晶体各向异性,结构的匀称性和波导效应导致了偏振方向沿着激光腔的有源区的横截面的任一方向(垂直于激光发射方向)或者优先取向于在正交基坐标系下 $\hat{x}$ 和 $\hat{y}$ 的任一方向(取两个正交基矢 $e_x = \hat{x}$, $e_y = \hat{y}$),若偏振方向优先取向于 $\hat{x}$ 方向为 $\hat{x}$ 偏振,而偏振方向优先取向于 $\hat{y}$ 方向为 $\hat{y}$ 偏振,另外偏振方向优先取向于 $\hat{x}$ 和 $\hat{y}$ 的合成方向为混合偏振(同时包括 $\hat{x}$, $\hat{y}$ 偏振,即椭圆偏振或圆偏振).外界温度变化,注入电流的变化和外部光注入都会引起 VCSEL 输出的偏振方向在 $\hat{x}$ 和 $\hat{y}$ 之间转换,即在一定的条件下,VCSEL 输出偏振态可以为 $\hat{x}$ 线性偏振(简称为 LP_x)或 $\hat{y}$ 线性偏振(简称为 LP_y),或混合偏振(同时包括 $\hat{x}$ 线性偏振和 $\hat{y}$ 线性偏振),结果 VCSEL 输出的动态行为对激光场的偏振非常敏感,因此 VCSEL 为矢量激光器^[17],在一定条件下,这种矢量激光器输出的光场强和相位都为混沌行为,而且还具偏振特性(又称之为矢量混沌).

近年来,许多学者对光反馈 VCSEL 混沌同步保密通信系统也做了大量的研究^[18-24],然而,他们研究的光反馈 VCSEL 模型并没考虑 VCSEL 的矢量特性,而仅仅考虑了几个横模,并没有考虑每一横模都有两个正交的线性偏振模存在,因此这些模型只适用于常用的、极化稳定的半导体激光器.而 SFM 模型考虑了有两个正交的线性偏振单横模.SFM 模型准确描述了当注入电流接近于激光于阈值电流时,外部扰动(如电流注入、外部光注入和光反馈注入)能引起 VCSEL 两个线性极化偏振的相互转换.近来,Hong 等在实验上观察了基于光反馈的单向耦合注入 VCSEL 同步系统的矢量混沌同步,在这个实验上考虑了接收激光器受偏光注入和旋转偏振光注入的两种情形下的混沌同步特性^[25],在此基础上, Lee 等通过实验实现了矢量混沌保密通信^[26].基于光反馈的单向耦合注入 VCSEL 的矢量混沌同步质量是实现该系统保密通信的关键技术指标,矢量同步特性的物理机制尚缺乏深入的洞察.基于此,本文对基于光反馈的单向耦合注入 VCSEL 矢量混沌同步进行深入研究.

2. 理论模型

图 1 给出了基于光反馈的单向耦合注入 VCSEL

矢量同步系统示意图,上面部分为发射系统,下面部分为同步解调接收系统.图中的中密度滤波器 NDF 用来调节反馈量,可调衰减器 VA 用来调节注入量, T_VCSEL , R_VCSEL 分别为发射、接收激光器,且均为单横模四能级量子阱 VCSEL,光隔离器 IS1 是为了保证 T_VCSEL 输出的光单向注入到 R_VCSEL ,即防止光从 R_VCSEL 端面反馈而注入到 T_VCSEL ,从而影响 T_VCSEL 的输出动态特性.另外,IS2 为了防止从极化分束器 2 反馈的光注入到 R_VCSEL . T_VCSEL 的输出光分成两路,一路光经平面镜反馈后注入 T_VCSEL ,另一路光经传输信道后通过光隔离器分成两束光,一束光单向耦合注入到 R_VCSEL ,另一束光经过极化分束器 1 分为两个相互垂直线性偏振态 LP_{tx} 和 LP_{ty} (下标 t 表示发射系统),它们分别通过光电探测器 PD_1 和 PD_2 .此时,接收系统输出的光由极化分束器 2 分成两个相互垂直线性偏振态 LP_{rx} 和 LP_{ry} (下标 r 表示接收系统),并分别通过光电探测器 PD_3 和 PD_4 ,这样就可实现 LP_{tx} 和 LP_{rx} 以及 LP_{ty} 和 LP_{ry} 矢量同步.

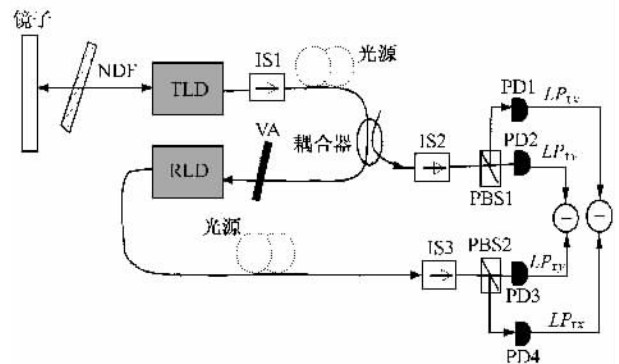


图 1 单向耦合光反馈 VCSELs 矢量混沌同步系统示意图 NDF 为中密度滤波器,IS 为光隔离器,VA 为可调衰减器,PBS 为极化分束器,PD 为光电检测器, T_VCSEL 为发射 VCSEL, R_VCSEL 为接收 VCSEL.

根据 SFM 模型,原 SFM 模型并没有包括光反馈注入,因此,当 T_VCSEL 受到各向同性光弱反馈(矢量光反馈)时,根据 Lang-Kobayashi 近似,为便于讨论,忽略自发辐射噪声和光纤的非线性效应,并设 T_VCSEL 和 R_VCSEL 中心频率失谐频差 $\Delta\omega = 0$,其速率方程组为修正的 SFM 模型^[17, 27-29],即在左、右旋基坐标系下,其速率方程组为

$$\frac{dA_{\pm}(t)}{dt} = \tau g(1 + ia\chi)N_{\pm}(t) - N_0 A_{\pm}(t)$$

$$-kA_{\pm}(t) - (\gamma_a + i\gamma_p)A_{\mp}(t) + k_t A_{\pm}(t - \tau_c) \exp[(\lambda - \omega_0 \tau)], \quad (1)$$

$$\frac{dN_{\pm}(t)}{dt} = \frac{I}{2eV} - \gamma_e N_{\pm}(t) - 2g(N_{\pm}(t) - N_0) \times |A_{\pm}(t)|^2 - \gamma_j(N_{\pm}(t) - N_{\mp}(t)), \quad (2)$$

与 T₋ VCSEL 相似, R₋ VCSEL 受到 T₋ VCSEL 的矢量光注入, 其速率方程组为

$$\frac{dA_{\pm}(t)}{dt} = \tau g(1 + ia)(N_{\pm}(t) - N_0)A_{\pm}(t) - kA_{\pm}(t) - (\gamma_a + i\gamma_p)A_{\mp}(t) + k_r A_{\mp}(t - \tau_c) \exp[(-i\omega_0 \tau_c)], \quad (3)$$

$$\frac{dN_{\pm}(t)}{dt} = \frac{I}{2eV} - \gamma_e N_{\pm}(t) - 2g(N_{\pm}(t) - N_0) \times |A_{\pm}(t)|^2 - \gamma_j(N_{\pm}(t) - N_{\mp}(t)), \quad (4)$$

式中, t 和 r 分别代表发射和接收系统, $A_{\pm}$ 分别为激光场的左、右圆偏振慢变振幅, $N_{\pm}$ 分别为上旋和下旋载流子密度. 此外, $k = 1/(2\tau_p)$, τ_p 为光子寿命, g 为微分材料增益, N_0 为每个自旋方向的透明载流子密度, a 是线宽增强因子, Γ 为有源层的限制因子, γ_a, γ_p 分别为各向异性光场振幅损耗速率和有源介质线性双折射效应. I 为注入电流, e 为单位电荷, V 为激光有源层体积, γ_e 为非辐射载流子驰豫振荡速率, γ_j 自旋反转速率, V 为激光器有源区体积, k_t, k_r 分别为反馈和注入系数, ω_0 为 T₋ VCSEL 和 R₋ VCSEL 的中心频率, τ_c 为外部光反馈延迟时间, τ_c 为光从 T₋ VCSEL 到 R₋ VCSEL 的传输时间.

引入归一化变量

$$E_{\pm}(t) = \sqrt{g/\gamma_e} A_{\pm}(t), \quad (5)$$

$$N(t) = \Gamma \frac{g}{k} \left(\frac{N_+(t) + N_-(t)}{2} - N_0 \right), \quad (6)$$

$$n(t) = \Gamma \frac{g}{k} \frac{N_+(t) - N_-(t)}{2}, \quad (7)$$

基于正交基坐标系, 将左、右旋圆偏振态转化为正交化线性偏振态

$$E_x(t) = \frac{E_+(t) + E_-(t)}{\sqrt{2}}, \quad E_y(t) = -i \frac{E_+(t) - E_-(t)}{\sqrt{2}}, \quad (8)$$

又令

$$E_x(t) = e_x(t) \exp[i\varphi_x(t)], \quad E_y(t) = e_y(t) \exp[i\varphi_y(t)]. \quad (9)$$

把方程(5)–(9)代入方程(1)–(4)得到 T₋ VCSEL 的速率方程组

$$\frac{de_{tx}}{dt} = [k(N_t - 1) - \gamma_a]e_{tx} - kn_t e_{ty} \times [\sin(\varphi_{ty} - \varphi_{tx}) + a \cos(\varphi_{ty} - \varphi_{tx})] + k_t e_{tx}(t - \tau) \cos[\varphi_{tx} - \varphi_{tx}(t - \tau) + \omega_0 \tau], \quad (10)$$

$$\frac{d\varphi_{tx}}{dt} = [k\alpha(N_t - 1) - \gamma_p] + \frac{kn_t e_{ty}}{e_{tx}} \times [\cos(\varphi_{ty} - \varphi_{tx}) - a \sin(\varphi_{ty} - \varphi_{tx})] - k_t \frac{e_{tx}(t - \tau)}{e_{tx}} \sin[\varphi_{tx} - \varphi_{tx}(t - \tau) + \omega_0 \tau], \quad (11)$$

$$\frac{de_{ty}}{dt} = [k(N_t - 1) + \gamma_a]e_{ty} - kn_t e_{tx} \times [\sin(\varphi_{ty} - \varphi_{tx}) - a \cos(\varphi_{ty} - \varphi_{tx})] + k_t e_{ty}(t - \tau) \cos[\varphi_{ty} - \varphi_{ty}(t - \tau) + \omega_0 \tau], \quad (12)$$

$$\frac{d\varphi_{ty}}{dt} = [k\alpha(N_t - 1) + \gamma_p] - \frac{kn_t e_{tx}}{e_{ty}} \times [\cos(\varphi_{ty} - \varphi_{tx}) + a \sin(\varphi_{ty} - \varphi_{tx})] - k_t \frac{e_{ty}(t - \tau)}{e_{ty}} \sin[\varphi_{ty} - \varphi_{ty}(t - \tau) + \omega_0 \tau], \quad (13)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \gamma_e [1 - N(1 + e_{tx}^2 + e_{ty}^2) + \mu + 2e_{ty}e_{tx}n_t \sin(\varphi_{ty} - \varphi_{tx})], \quad (14)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\gamma_s n_t - \gamma_e n_t (e_{tx}^2 + e_{ty}^2) + 2\gamma_e N_t e_{ty} e_{tx} \sin(\varphi_{ty} - \varphi_{tx}), \quad (15)$$

R₋ VCSEL 速率方程组又可写为

$$\frac{de_{rx}}{dt} = [k(N_r - 1) - \gamma_a]e_{rx} - kn_r e_{ry} \times [\sin(\varphi_{ry} - \varphi_{rx}) + a \cos(\varphi_{ry} - \varphi_{rx})] + k_r e_{rx}(t - \tau_c) \cos[\varphi_{rx} - \varphi_{rx}(t - \tau_c) + \omega_0 \tau_c], \quad (16)$$

$$\frac{d\varphi_{rx}}{dt} = [k\alpha(N_r - 1) - \gamma_p] + \frac{kn_r e_{ry}}{e_{rx}} \times [\cos(\varphi_{ry} - \varphi_{rx}) - a \sin(\varphi_{ry} - \varphi_{rx})] - k_r \frac{e_{rx}(t - \tau_c)}{e_{rx}} \sin[\varphi_{rx} - \varphi_{rx}(t - \tau_c) + \omega_0 \tau_c], \quad (17)$$

$$\frac{de_{ry}}{dt} = [k(N_r - 1) + \gamma_a]e_{ry} - kn_r e_{rx}$$

$$\times [\sin(\varphi_{ry} - \varphi_{rx}) - a \cos(\varphi_{ry} - \varphi_{rx})] \\ + k_r e_{ly}(t - \tau_c) \cos[\varphi_{ry} - \varphi_{ly}(t - \tau_c) \\ + \omega_0 \tau_c], \quad (18)$$

$$\frac{d\varphi_{ry}}{dt} = [ka(N_r - 1) + \gamma_p] - \frac{kn_r e_{rx}}{e_{ry}} \\ \times [\cos(\varphi_{ry} - \varphi_{rx}) + a \sin(\varphi_{ry} - \varphi_{rx})] \\ - k_r \frac{e_{ly}(t - \tau_c)}{e_{ry}} \sin[\varphi_{ry} - \varphi_{ly}(t - \tau_c) \\ + \omega_0 \tau_c], \quad (19)$$

$$\frac{dN_r(t)}{dt} = \gamma_d [- N_r(1 + e_{rx}^2 + e_{ry}^2) + \mu \\ + 2e_{ry}e_{rx}n_l \sin(\varphi_{ry} - \varphi_{rx})], \quad (20)$$

$$\frac{dn_r(t)}{dt} = -\gamma_s n_r - \gamma_e n_l (e_{rx}^2 + e_{ry}^2) \\ + 2\gamma_e N_r e_{ry} e_{rx} \sin(\varphi_{ry} - \varphi_{rx}), \quad (21)$$

式中, e_x, e_y 分别正交化线性偏振振幅, φ_x, φ_y 与之相对应的相位, $\gamma_s = \gamma_e + 2\gamma_j$, $\mu = (\Gamma g/k) \times$

$[I/(2eV\gamma_e) - N_0] \mu$ 是归一化的注入电流, 当激光器在阈值电流运行时, μ 取值为 1.

3. 结果与讨论

与基于 EEL 的单向耦合注入的同步保密通信系统相类似^[13-16], 由 VCSEL 构成的单向耦合同步保密通信系统也有存在两种同步类型, 一种为完全混沌同步, 当 T-VCSEL 和 R-VCSEL 的参数完全匹配, 并且 R-VCSEL 的注入强度和 T-VCSEL 的反馈强度相等时, 这种同步才能实现. 另一种同步类型为注入锁定同步(又称为广义同步), 要使这种同步很好地实现, 要求 R-VCSEL 的注入强度远大于 T-VCSEL 的反馈强度, 这种同步允许 T-VCSEL 和 R-VCSEL 的参数失配有更大的容许极限. R-VCSEL 和 T-VCSEL 的相关系数 ρ 是衡量两系统同步品质的关键技术指标, 两种同步的相关系数分别定义为^[5]

$$\rho_{C_{x,y}} = \frac{[I_{lx,y}(t - \Delta t_1) - I_{lx,y}(t - \Delta t_1)] [I_{rx,y}(t) - I_{rx,y}(t)]}{\{[I_{lx,y}(t - \Delta t_1) - I_{lx,y}(t - \Delta t_1)]^2 [I_{rx,y}(t) - I_{rx,y}(t)]^2\}^{1/2}}, \quad (22)$$

$$\rho_{I_{x,y}} = \frac{[I_{lx,y}(t - \Delta t_2) - I_{lx,y}(t - \Delta t_2)] [I_{rx,y}(t) - I_{rx,y}(t)]}{\{[I_{lx,y}(t - \Delta t_2) - I_{lx,y}(t - \Delta t_2)]^2 [I_{rx,y}(t) - I_{rx,y}(t)]^2\}^{1/2}}, \quad (23)$$

式中 $\bar{}$ 表示对时间取平均, 下标 C, I 分别代表完全同步和注入锁定同步, 而 x, y 分别代表是 $\hat{x}$ 偏振、 $\hat{y}$ 偏振. $\Delta t_1 = \tau_c - \tau$, $\Delta t_2 = \tau_c$, $I_{lx} = e_{lx}^2$, $I_{ly} = e_{ly}^2$, $I_{rx} = e_{rx}^2$, $I_{ry} = e_{ry}^2$ 且 $0 \leq \rho_{C,I} \leq 1$. 较大 $\rho_{C,I}$ 意味着系统能够达到很好的同步, 尤其当 $\rho_C = 0$ 时, R-VCSEL 和 T-VCSEL 完全失步, 而当 $\rho_C = 1$ 时, R-VCSEL 和 T-VCSEL 能够实现最好的完全同步.

3.1. 完全矢量同步

为描述系统的矢量混沌同步特性, 我们分别定义 T-VCSEL 输出的线性偏振能量与总能量之比分别为

$$PC_{lx} = \frac{I_{lx}(t - \Delta t_1)}{I_{lx}(t - \Delta t_1) + I_{ly}(t - \Delta t_1)}, \\ PC_{ly} = \frac{I_{ly}(t - \Delta t_1)}{I_{lx}(t - \Delta t_1) + I_{ly}(t - \Delta t_1)} \quad (24a)$$

R-VCSEL 输出的线性偏振能量与总能量之比分别为

$$PC_{rx} = \frac{I_{rx}(t)}{I_{rx}(t) + I_{ry}(t)},$$

$$PC_{ry} = \frac{I_{ry}(t)}{I_{rx}(t) + I_{ry}(t)}. \quad (24b)$$

通过四阶龙格库塔方法对常微分方程组(16)~(27)进行数值解, 数值模拟所用的参数取值如下: $a = 3$, $k = 300$ GHz, $\gamma_s = 50$ GHz, $\omega_0 = 2.2176 \times 10^{15}$ rad/s 相应的中心波长为 850 nm, $\gamma_e = 1$ GHz, $\gamma_a = -0.1$ GHz, $\gamma_p = 6$ GHz, $\mu, k_r, k_l, \tau_c, \tau$ 为自由选择参数.

图 2 给出了当 $k_l = k_r = 1.3$ GHz, $\tau_c = 5$ ns, $\tau = 2$ ns 时 T-VCSEL 和 R-VCSEL 输出线性偏振态的相关系数、能量比与 μ 关系曲线图. 从图 2(a) 中可以看出当 $\mu = 1-1.22$ 时, 两个相关系数 ρ_{Cx} 和 ρ_{Cy} 在 $-0.2-1$ 之间呈波动变化. 在这种条件下, 图 2(b) 和 (c) 中表明, PC_{ly} 和 PC_{lx} 不断相互交换, PC_{ry} 和 PC_{rx} 也相互之间不断转换, 即 T-VCSEL 输出的 $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模相互之间持续不断地转换, 而此时 R-VCSEL 输出的 $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模也作同步地相互不断地转换, 结果系统输出要么占主导的 $\hat{x}$ 偏振模, 要么是占主导的 $\hat{y}$ 偏振模, 要么是混合偏振模.

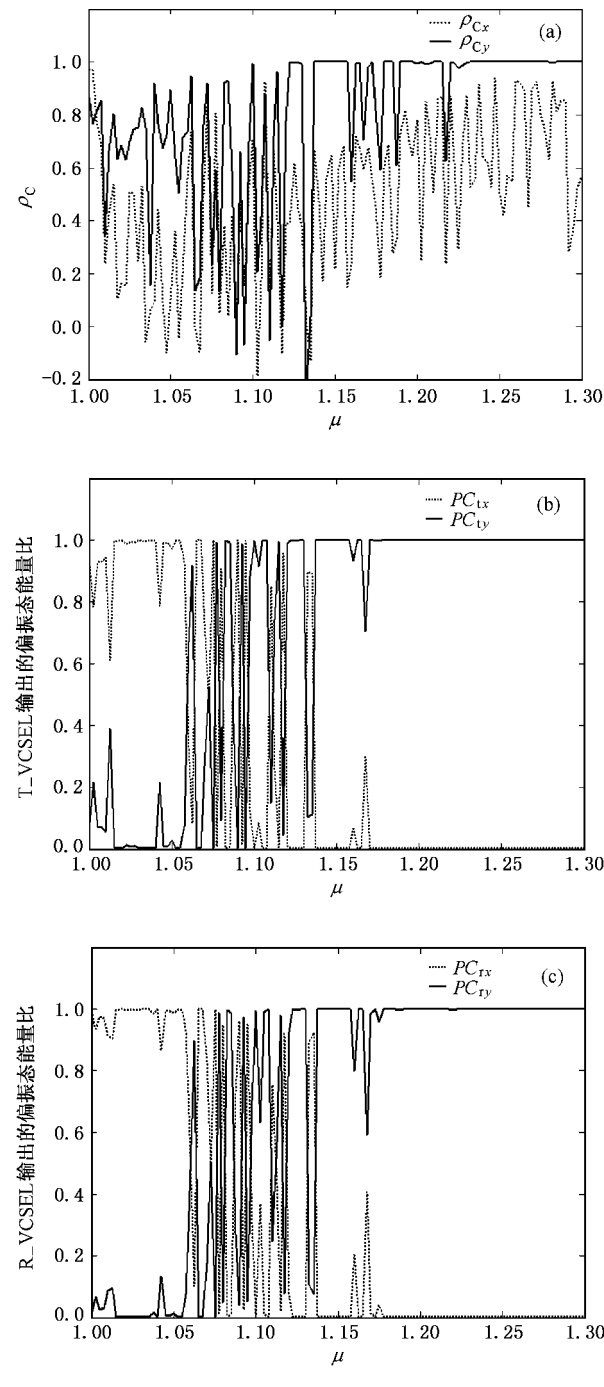


图 2 当 $k_i = k_r = 1.3 \text{ GHz}$, $\tau_c = 5 \text{ ns}$, $\tau = 2 \text{ ns}$ 时,两系统输出线性偏振的相关系数、能量比与 μ 关系曲线图

此外,当 $\mu = 1.03$ 时, $\hat{x}$ 偏振模占主导地位, $\hat{y}$ 偏振模被抑制,而相应的 $\hat{x}$ 偏振模的相关系数 ρ_{Cx} 为 0.247,这意味着占主导的 $\hat{x}$ 偏振模只能获得很差的完全同步质量.另一方面,当 $\mu = 1.0788$,系统输出为混合偏振模,对应的 $\hat{x}$ 偏振模相关系数 ρ_{Cx} 和 $\hat{y}$ 偏振模的相关系数 ρ_{Cy} 分别为 0.362 和 0.428,这表明 $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模不能同时获得很好地完全同步质

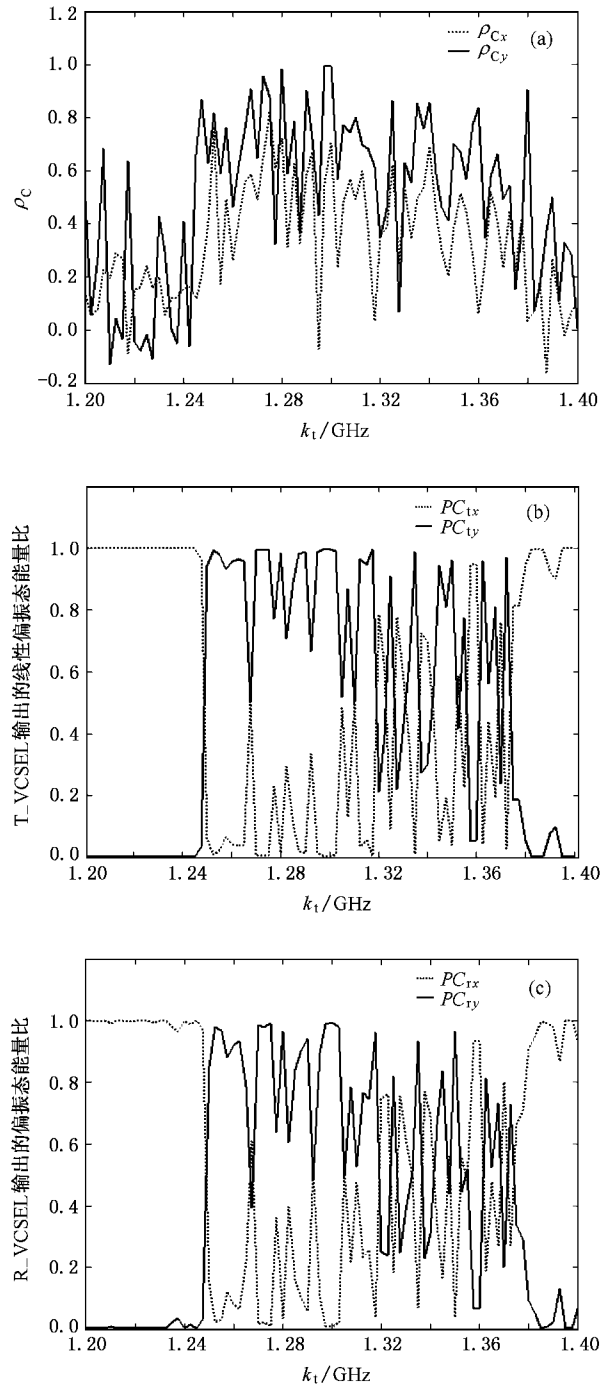


图 3 当 $\mu = 1.1$, $\tau_c = 5 \text{ ns}$, $\tau = 2 \text{ ns}$ 和 $k_i = k_r$ 时,两系统输出线性偏振的相关系数、能量比与 k_i 关系曲线图

量.最后,当 $\mu = 1.084$, $\hat{y}$ 偏振模占主导地位,对应的相关系数 ρ_{Cy} 为 0.927,此时 $\hat{y}$ 偏振模能获得较好的完全同步质量,然而微小变化的注入电流使这种同步质量恶化.当 μ 进一步从 1.22 增加到 1.3 时, ρ_{Cy} 逐渐稳定地达到 1, ρ_{Cx} 却减为 0,这时系统输出完全为 $\hat{y}$ 偏振模,这时 $\hat{y}$ 偏振模能获得最好的完全同步

质量.

图 3 给出了当 $\mu = 1.1, \tau_c = 5 \text{ ns}, \tau = 2 \text{ ns}, k_l = k_r$ 时, T_VCSEL 和 R_VCSEL 输出线性偏振的相关系数、能量比与 k_l 关系曲线图. 当 k_l 取值在 1.2—1.4 GHz 时, PC_{ly} 和 PC_{lx} 以及 PC_{ry} 和 PC_{rx} 之间不断相互转换 (如图 3(b) 和 (c) 所示). 换句话说, 通过略微变化 k_l 而引起发射激光器 $\hat{y}$ 偏振和 $\hat{x}$ 偏振之间相互转换, 接收激光器 $\hat{y}$ 偏振和 $\hat{x}$ 偏振之间也作同步地转换, 这导致了 ρ_{cx} 和 ρ_{cy} 剧烈振动. 从图中可以进一步看出, 首先, 当 $k_l = 1.319 \text{ GHz}$ 时, 系统输出为混合偏振模, 相对应的相关系数 ρ_{cx} 和 ρ_{cy} 分别是 0.17 和 0.455, 这表明 $\hat{y}$ 偏振和 $\hat{x}$ 偏振不能同时获得很好的完全同步质量. 其次, 当 $k_l = 1.22 \text{ GHz}$ 时, 系统输出由 $\hat{x}$ 偏振模起主导作用, 对应的相关系数 ρ_{cx} 为 0.148, 这表明主导的 $\hat{x}$ 偏振模获得很差的完全同步质量. 第三, 当 $k_l = 1.3 \text{ GHz}$ 时, 系统输出由 $\hat{y}$ 偏振起主导作用, 对应的相关系数 ρ_{cy} 接近 1, 这意味占主导的 $\hat{y}$ 偏振能取得较好的完全同步质量, 然而略微变化的 k_l 会破坏 $\hat{y}$ 偏振的完全同步质量.

相反, 图 4 给出了除 $\mu = 1.25$, 其他参数与图 3 一样时, T_VCSEL 和 R_VCSEL 输出线性偏振的相关系数、能量比与 k_l 关系曲线图. 从图 4(a) 和 (b) 来看, T_VCSEL 和 R_VCSEL 输出的线性偏振都为 $\hat{y}$

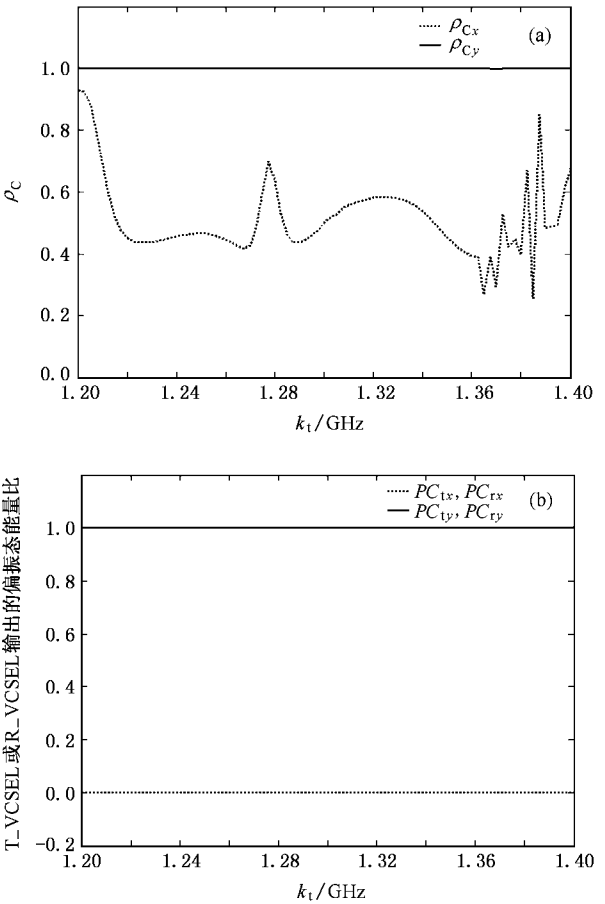


图 4 除 $\mu = 1.25$, 其他参数与图 3 一样时, 两系统输出线性偏振的相关系数、能量比与 k_l 关系曲线图

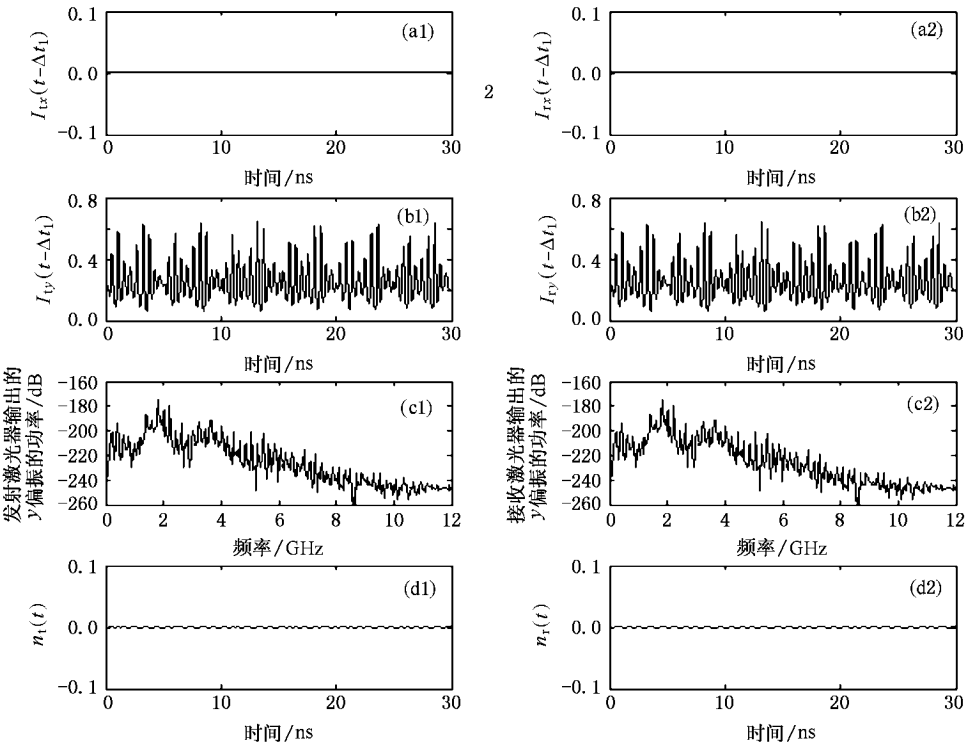


图 5 当 $k_l = k_r = 1.3 \text{ GHz}, \mu = 1.25$, 并且 $\tau_c = 5 \text{ ns}, \tau = 2 \text{ ns}$ 时, 系统的矢量动态行为

偏振,其相应的相关系数为 1,若取 $k_l = 1.3 \text{ GHz}$,其对应的矢量动力学行为如图 5 所示,可以看出, T_ VCSEL 和 R_ VCSEL 的输出只有 $\hat{y}$ 偏振,且它的动态行为是混沌,它的相对时间轨迹和功率谱分布(0—12 GHz 左右)基本相同,这表明完全占主导的 $\hat{y}$ 偏振模能够稳定的实现最好的完全混沌同步质量,以上分析表明 $\hat{y}$ 偏振模能获得最好的完全同步质量,当

$$\Delta t_l = \tau_c - \tau \neq 0, \tag{25a}$$

$$n_l = n_r = 0, \tag{25b}$$

$$I_{lx} = I_{rx} = 0, \tag{25c}$$

$$I_{ly}(t) = I_{ly}(t - \Delta t_l), \tag{25d}$$

$$\varphi_{ly}(t) = \varphi_{ly}(t - \Delta t_l) - \omega_0 \Delta t_l, \tag{25e}$$

然而,当 μ 接近阈值电流时,占主导的 $\hat{y}$ 偏振模暂时获得较好的完全同步质量,这种同步对参数 k_l 和 μ 非常敏感,略微改变 k_l 或 μ ,这种同步会受到破坏.其原因如下,略微改变 k_l 或 μ 会使被严重抑制 $\hat{x}$ 偏振模重新出现,从而导致了 T_ VCSEL 和 R_ VCSEL 的匀称性遭到破坏.相比之下,当 μ 远大于阈值电流且系统满足方程(25a)–(25e)时,完全占主导 $\hat{y}$ 偏振模就能获得最好的完全同步质量.其原因如下:在较大电流注入下, $\hat{y}$ 偏振模能获得较高的增益,而 $\hat{x}$ 偏振模只能获得较小的增益,这导致了 $\hat{y}$ 偏振模严重抑制 $\hat{x}$ 偏振模.这种条件下,系统输出完全由稳定的 $\hat{y}$ 偏振模来主导,这与由 EEL 构成单向耦合同步保密通信系统很相似.相反,当 μ 接近阈值电流时, $\hat{x}$ 偏振模能获得较高的增益,此时系统输出暂时由 $\hat{x}$ 偏振模来主导,这也使 $\hat{y}$ 偏振模受到严重的抑制.尽管 $\hat{y}$ 偏振模受到严重的抑制,但是 $\hat{y}$ 偏振模仍然存在^[30],另外,略微增加的外部光扰动使 $\hat{x}$ 偏振模的高增益很快减小,这些因素导致了 $\hat{x}$ 偏振模的同步质量全面减小,即由 $\hat{x}$ 偏振模构成的驱动响应系统的最大 Lyapunov 指数为正^[6].结果当 μ 接近阈值电流时,主导的 $\hat{x}$ 偏振模获得较差的完全同步质量.

图 6 给出了当 $\tau_c = 2 \text{ ns}$, $\tau = 2 \text{ ns}$,其他参数与图 2 一致时,极化偏振态的相关系数、能量比与 μ 关系曲线图,图 6(b)表明了 PC_{lx} 和 PC_{rx} 以及 PC_{ly} 和 PC_{ry} 随着 μ 变化轨迹其本相同,则 T_ VCSEL 和 R_ VCSEL 有相同的极化偏振态转换,图 6(a)给出了相关系数 ρ_{Cy} 和 ρ_{Cx} 始终为 1,换句话说,无论系统的输出是由 $\hat{x}$ 偏振模主导,还是由 $\hat{y}$ 偏振模统治,还是

混合偏振, $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模都能稳定获得最好的完全同步质量.这与 μ 变化引起激光器输出的线性偏振态无关.另外,图 7 给出了 $\tau_c = 2 \text{ ns}$, $\tau = 2 \text{ ns}$,其他参数与图 3 一致时,极化偏振态的相关系数、能量比与 k_l 关系曲线图,从图 7(a)和(b)中观察到此时系统与图 6 有相似的结果,即 $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模都能稳定获得最好的完全同步质量,这与反馈系数引起的线性偏振态无关.

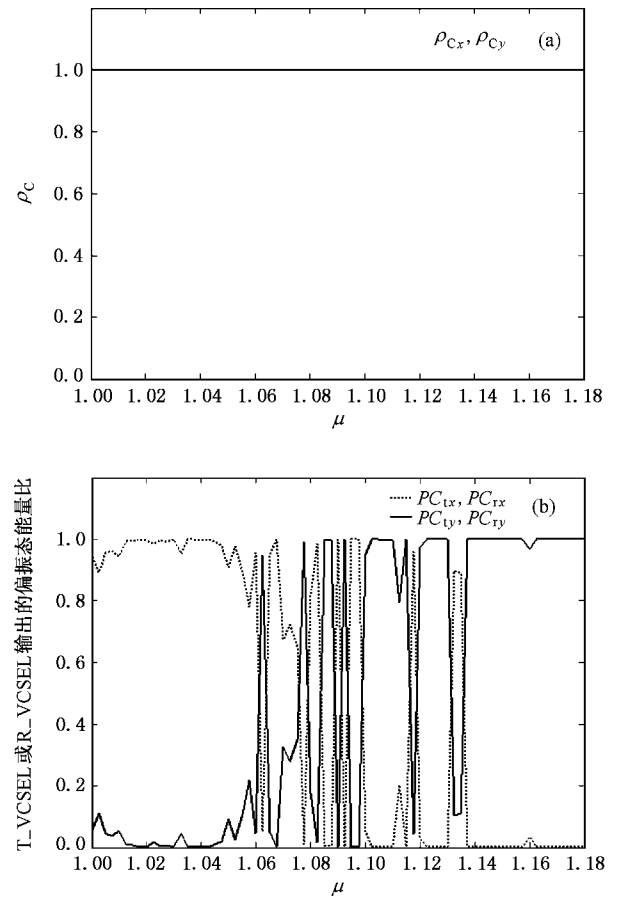


图 6 除 $\tau_c = \tau = 2 \text{ ns}$,其他参数与图 2 一致时,两系统输出线性偏振的相关系数、能量比与 μ 关系曲线图

以上分析表明当 $\Delta t_l = \tau_c - \tau = 0$ 时, LP_{lx} 和 LP_{rx} 以及 LP_{ly} 和 LP_{ry} 均可以达到完全同步,即

$$I_{rx}(t) = I_{lx}(t), \tag{26a}$$

$$I_{ry}(t) = I_{ly}(t), \tag{26b}$$

$$\varphi_{ry}(t) = \varphi_{ly}(t), \tag{26c}$$

$$\varphi_{rx}(t) = \varphi_{lx}(t), \tag{26d}$$

因为当 $\Delta t_l = 0$ 时,发射系统和接收系统完全对称,根据 PC 同步原理^[31],接收激光器能完全复制发射

激光器输出的线性偏振态.

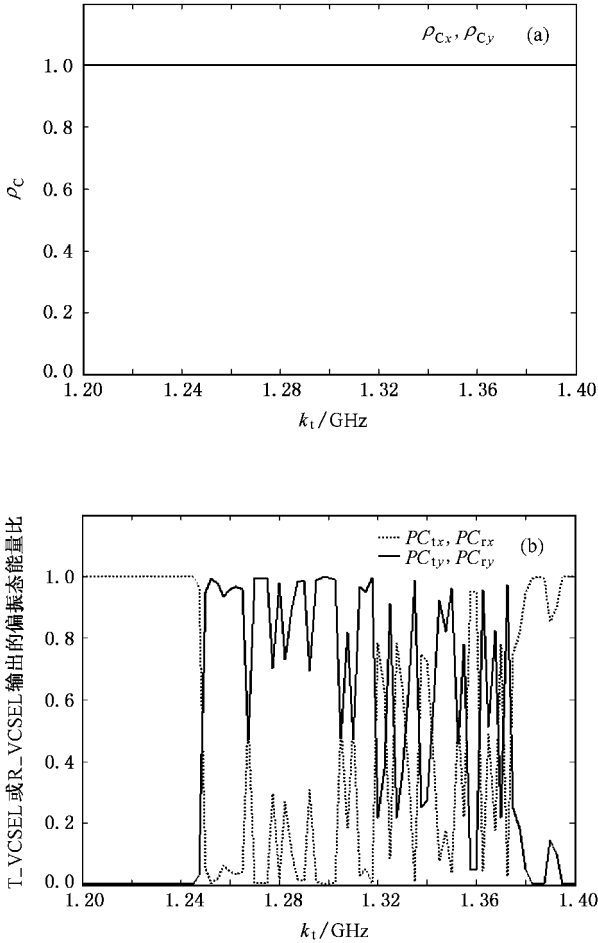


图 7 除 $\tau_c = \tau = 2 \text{ ns}$,其他参数与图 3 一致时 ,两系统输出线性偏振的相关系数、能量比与 k_1 关系曲线图

3.2. 强注入锁定矢量同步(广义同步)

强注入锁定矢量混沌同步是指当接收激光器受到来自发射激光器的矢量混沌信号(简称为注入矢量)强注入 ,即注入系数远大于反馈系数时 ,接收系统输出矢量混沌信号与注入矢量混沌信号相同步 .为了描述注入矢量和接收激光输出的偏振态 ,每一个注入矢量的能量与注入矢量的总能量的比值定义如下 :

$$PI_{tx} = \frac{C_1 I_{tx}(t - \Delta t_2)}{C_1 I_{tx}(t - \Delta t_2) + C_2 I_{ty}(t - \Delta t_2)} , \tag{27a}$$

$$PI_{ty} = \frac{C_1 I_{ty}(t - \Delta t_2)}{C_1 I_{tx}(t - \Delta t_2) + C_2 I_{ty}(t - \Delta t_2)} , \tag{27b}$$

其中

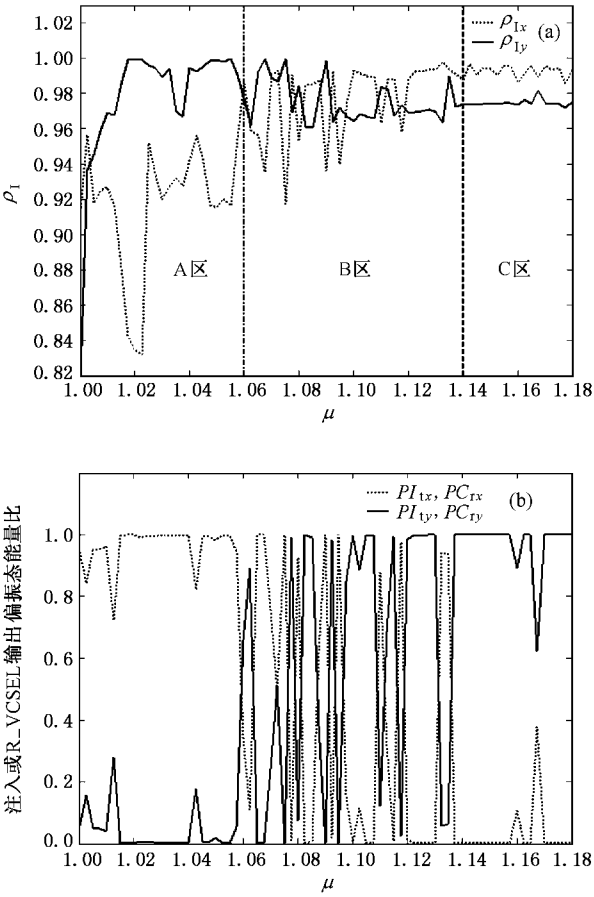


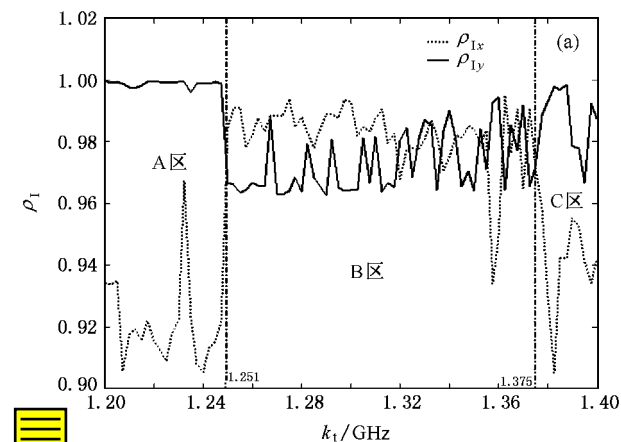
图 8 除 $k_r = 80k_1$,其他参数与图 2 一致时 ,两系统输出线性偏振的相关系数、能量比与 μ 关系曲线图

$$C_1 = \frac{I_{rx}(t)}{I_{tx}(t - \Delta t_2)} ,$$
$$C_2 = \frac{I_{ry}(t)}{I_{ty}(t - \Delta t_2)} ,$$
$$\Delta t_2 = \tau_c .$$

图 8 给出了当 $k_r = 80k_1$ 时 ,其他参数与图 2 一样时 ,T-VCSEL 和 R-VCSEL 输出线性偏振态的相关系数、能量比与 μ 关系曲线图 ,从图 8 (a)中可以看出 ,随着注入电流在 1 到 1.18 变化时 ,与之相对应相关系数 ρ_{lx} 在 0.83—1 范围内变化 ,相关系数 ρ_{ly} 在 0.832—1 范围内振荡变化 .再者 ,从图 8 (b)中可以看出 :在这种条件下 ,系统输出的偏振态之间不断发生转换 ;因为 $PI_{tx} \approx PC_{rx}$, $PI_{ty} \approx PC_{ry}$,所以注入量与接收激光器输出有相同的偏振态 .再结合图 8 (a)和 (b) ,从中可以观察到 ,与图 2 相比较 ,在接收激光器受到强注入情况下 ,接收激光器输出的矢量与注入矢量能达到很好的同步 .然而 ,从图中进一步观察到 ,当 μ 从 1 到 1.06 取值时 ,注入矢量和接收

激光器的输出由 $\hat{x}$ 偏振模占主导,而 $\hat{y}$ 偏振模被抑制,他们对应的相关系数为图 8(a)中 A 同步区域.另一方面当 μ 从 1.06 到 1.14 增加时,注入矢量 $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模之间相互转换,且接收激光器的输出 $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模之间也作同步转换,每一个偏振模的相关系数为图 8(a)中 B 同步区域.当 μ 大于 1.14 时,注入矢量和接收激光器的输出由 $\hat{y}$ 偏振模占主导, $\hat{x}$ 偏振模被抑制,对应的相关系数为图 8(a)中 C 同步区域.在 A 同步区域中,当 $\mu = 1.055$ 时,系统输出由 $\hat{x}$ 偏振模主导,对应的相关系数 ρ_{1x} 为 0.92,而抑制的 $\hat{y}$ 偏振模的相关系数 ρ_{1y} 为 0.9997.在 C 同步区域中,当 $\mu = 1.14$ 时, $\hat{y}$ 偏振模起主导作用,相应的相关系数 ρ_{1y} 为 0.9738,而抑制的 $\hat{x}$ 偏振模的相关系数 ρ_{1x} 为 0.988.在同步区域 B 中,当 $\mu = 1.7024$ 时, $PI_{1x} \approx PI_{1y} \approx PC_{1x} \approx PC_{1y} \approx 0.5$,系统输出为混合偏振模,混合偏振中的 $\hat{x}$ 偏振和 $\hat{y}$ 偏振的相关系数分别为 0.987 和 0.992.

图 9 给出了当 $k_r = 80k_l$ 时,其他参数与图 3 一样时, T_{VCSEL} 和 R_{VCSEL} 输出线性偏振态的相关系数、能量比与 k_l 关系曲线图.从图 9(a)中可以



看出,当反馈系数 k_l 在 1.2—1.4 GHz 范围内变化时,则相关系数 ρ_{1x} 在 0.905—0.994 范围内振荡变化,而相关系数 ρ_{1y} 在 0.9627—0.9994 之间猛烈变化.此外,注入量偏振态与接收激光器输出的偏振态相同.结合图 9(a)和(b),每一个注入偏振都能与接收激光器输出的每一个对应的偏振实现很好的注入锁定同步.从图中进一步可以看出,随着 k_l 值不同,系统输出要么由 $\hat{x}$ 偏振模来主导,要么由 $\hat{y}$ 偏振模起主要作用,要么是混合偏振,他们接收注入锁定同步情况与图 8 相似.相应的同步区域显示在图 9(a)中.图 9(a)中 A 同步区域表明了占主导的 $\hat{x}$ 偏振模比被抑制的 $\hat{y}$ 偏振模获得更差的注入锁定同步质量,而 C 同步区域表明了占主导的 $\hat{y}$ 偏振模比被抑制的 $\hat{x}$ 偏振模接收的注入锁定同步质量更差.此外, B 同步区域描述了略微改变 k_l 值引起两个正交化偏振模相互转换,每一个偏振模的相关系数在 0.965 和 0.99 之间波动变化.如果混合偏振中,两个偏振能量非常接近时,他们能达到注入锁定同步质量几乎一致,而有较少能量的偏振能获得较高的注入锁定同步质量.

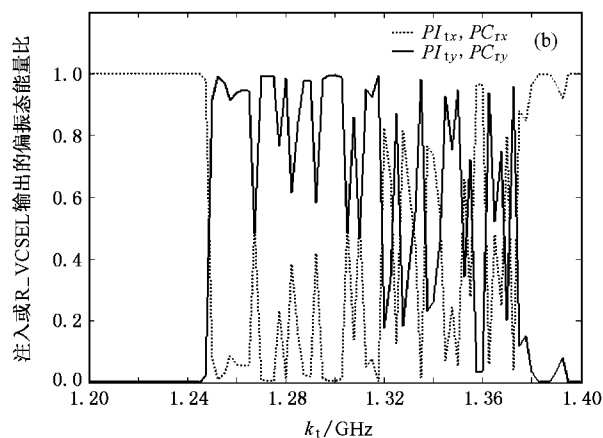


图 9 除 $k_r = 80k_l$ 其他参数与图 3 一致时,两系统输出线性偏振的相关系数、能量比与 k_l 关系曲线图

当 $k_l = 1.3$ GHz 时,从图 9 可以看出, $PI_{1y} = PC_{1y} = 1$ 和 $PI_{1x} = PC_{1x} = 0$,这意味着系统输出完全于 $\hat{y}$ 偏振模主导,其相关系数 ρ_{1x} 为 0.9642.图 10 给出了相应的矢量动力学行为,从图 10(a)~(c)可以看出,注入 $\hat{x}$ 偏振模和接收激光器输出的 $\hat{x}$ 偏振模的强度随时间变化的值为 0,而注入 $\hat{y}$ 偏振模和接收激光器输出的 $\hat{y}$ 偏振模的强度处于混沌状态,其对应的时间轨迹和频谱分布(大约为 0—8 GHz)几乎相同,以上说明了完全主导的 $\hat{y}$ 偏振能够获得很高的注入锁定混沌同步质量.其次,当 $k_l =$

1.326 GHz 时, $PI_{1y} = PC_{1y} = 0.58$ 和 $PI_{1x} = PC_{1x} = 0.42$,其相关系数分别为 0.978, 0.9735,其相应的矢量动力学行为如图 11 所示,从图 11 可以观察到, $\hat{x}$ 偏振和 $\hat{y}$ 偏振的动力学行为都为混沌,如图 11(a)和(c)所示,注入 $\hat{x}$ 偏振模和接收激光器输出的 $\hat{x}$ 偏振模的时间轨迹和相应的频谱分布(大约为 0—10 GHz)基本一样,而图 11(b)和(c)表明了注入 $\hat{y}$ 偏振模和接收激光器输出的 $\hat{y}$ 偏振模的时间轨迹和相应的频谱分布(大约为 0—12 GHz)基本相同,以上分析表明系统能很好地实现 $\hat{x}$ 偏振注入锁定混沌同步,

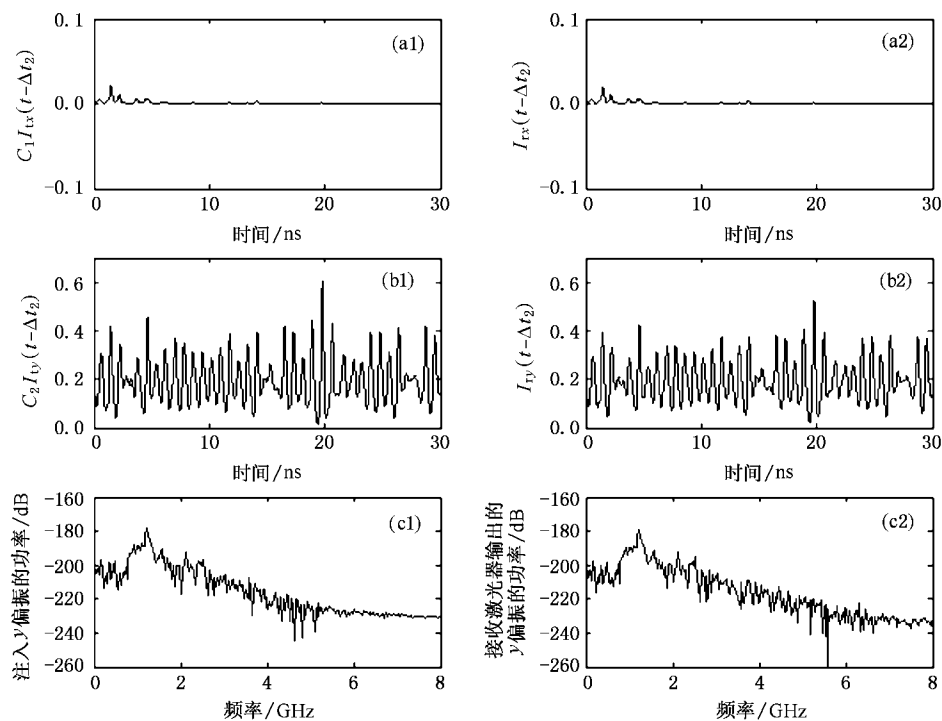


图 10 在图 9 中,当 $k_1 = 1.3 \text{ GHz}$ 时,系统的矢量动态行为

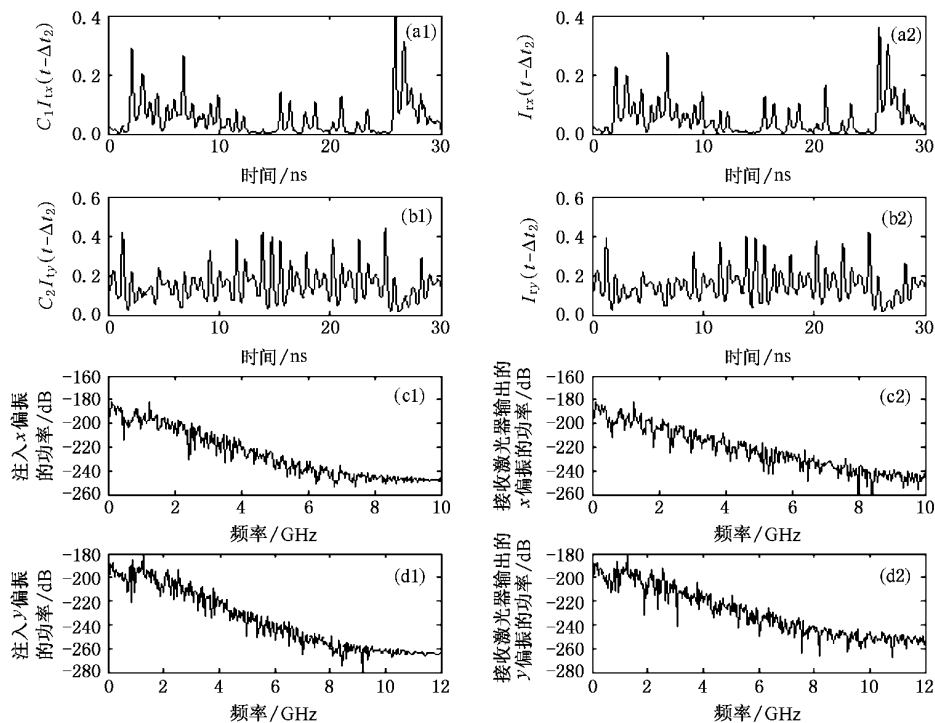


图 11 在图 9 中,当 $k_1 = 1.326 \text{ GHz}$ 时,系统的矢量动态行为

同时也能达到 $\hat{y}$ 偏振注入锁定混沌同步.再者,当 $k_1 = 1.4 \text{ GHz}$ 时,从图 9 可以观察到, $PI_{tx} = PC_{rx} = 1$ 和 $PI_{ty} = PC_{ry} = 0$ 此时系统输出完全被 $\hat{x}$ 偏振主导,其

相关系数为 0.9422.图 12 给出了相应的矢量动力学行为,从图 12(a)–(c)可以看出,注入 $\hat{x}$ 偏振模和接收激光器输出的 $\hat{x}$ 偏振模的时间轨迹和相应的频

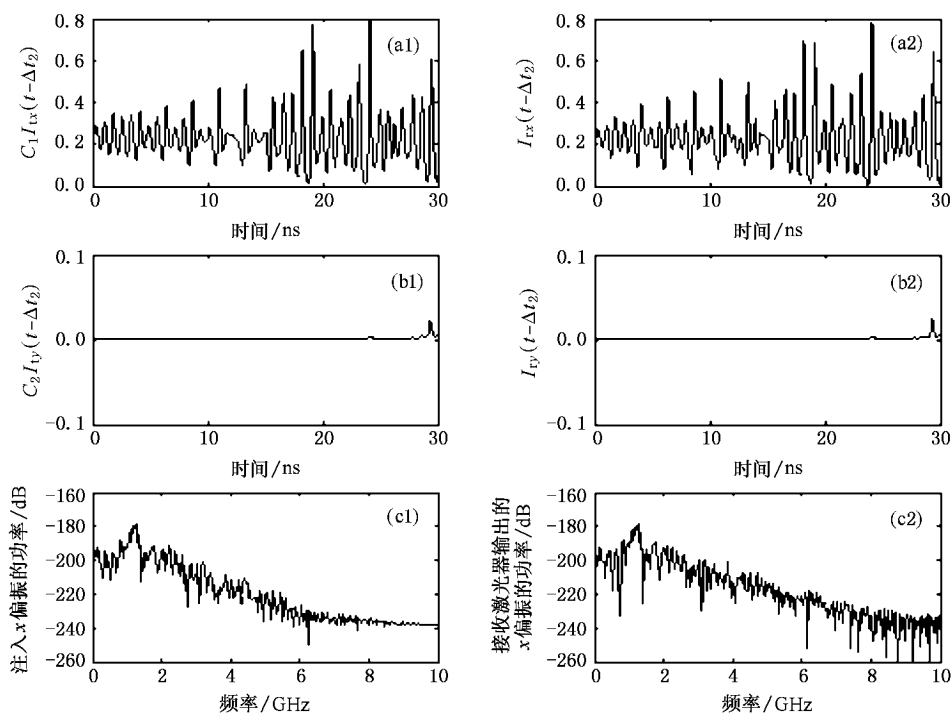


图 12 在图 9 中,当 $k_1 = 1.4$ GHz 时,系统的矢量动态行为

谱分布(大约为 0—10 GHz)也差不多一致,这意味着比偏振能获得很高的注入锁定混沌同步质量。

从图 8—12 可以得出,无论系统输出是由 $\hat{x}$ 偏振模主导,还是由 $\hat{y}$ 偏振模统治,还是混合偏振模,都能获得很高的同步质量,即

$$I_{ix}(t) \approx C_1 I_{ix}(t - \Delta t_2), \quad (28a)$$

$$I_{iy}(t) \approx C_2 I_{iy}(t - \Delta t_2), \quad (28b)$$

然而每一个主导的偏振模比相对应被抑制的偏振模获得注入锁定同步质量更差,如果混合偏振中,能量接近相等的两个偏振都能获得几乎一致且很高的注入锁定同步质量,能量较少的偏振获取的注入锁定同步质量更高。

4. 结 论

基于 SFM 模型,本文对基于光反馈的单向耦合注入光反馈垂直腔表面发射激光器的矢量混沌同步特性进行数值研究,研究结果表明,当外部光反馈时间 τ 等于光从发射系统到接收系统传输时间 τ_c 时,改变激光参数 μ 和 k_1 ,激光器输出要么由 $\hat{x}$ 偏振模主导,要么由 $\hat{y}$ 偏振模起主要作用,要么是混合偏振模,但是无论激光器输出偏振态如何,系统输出的 $\hat{x}$ 偏振模和 $\hat{y}$ 偏振模都能接收最好的完全混沌同步质

量。若 $\tau \neq \tau_c$,且注入电流接近阈值电流时,占主导的 $\hat{y}$ 偏振模能暂时实现较好的完全混沌同步质量。但是这个同步质量对参数 μ 和 k_1 非常敏感,即略微改变的参数 μ 和 k_1 很快破坏了 $\hat{y}$ 偏振模的完全同步。相比较而言,在这种条件下,主导的 $\hat{x}$ 偏振模始终接收较差的完全同步质量。另外,如果系统输出为混合偏振模,那么混合偏振模中的每一个偏振模接收较差的完全同步质量。当注入电流远大于阈值电流时,系统输出完全由 $\hat{y}$ 偏振模主导,完全主导的 $\hat{y}$ 偏振模能稳定地接收最好的完全同步质量。最后,当接收激光器受到线性偏振模的强注入时,每一个注入线性偏振模能与接收激光器输出的对应的线性偏振模实现很好的注入锁定同步。然而,每一个占主导的线性偏振模比另一被抑制的线性偏振模获得更差注入锁定同步质量、如果有相等的能量的两个线性偏振模同时存在,这两个线性偏振模获得差不多一致的注入锁定混沌同步质量,换句话说,能量较少的线性偏振能获得较高的注入锁定同步质量。以上结论为实现激光双信道保密通信以及光混沌保密通信中的解波分复用技术提供理论支持。

致谢 作者衷心感谢审稿人提出的合理化建议,使本文的工作相对完善。

- [1] Yan S L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2000 (in Chinese) [颜森林 2005 物理学报 **54** 2000]
- [2] Gu C M , Shen K 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 732 (in Chinese) [顾春明、沈 柯 1998 物理学报 **47** 732]
- [3] Yan S L , Wang S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1687 (in Chinese) [颜森林、汪胜前 2006 物理学报 **55** 1687]
- [4] Locquet A , Masoller C , Mirasso C R 2002 *Phys. Rev. E* **65** 2051
- [5] Zhong D , Xia G , Wu Z 2004 *J. of Optoelectr. and Adv. Mater.* **6** 1233
- [6] Wu J G , Wu Z M , Liu X D , Zhang Y , Zhong D Z , Xia G Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4169 (in Chinese) [吴加贵、吴正茂、林晓东、张 毅、钟东洲、夏光琼 2005 物理学报 **54** 4169]
- [7] Yan S L , Chi Z Y , Chen W J , Wan Z N 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1704 (in Chinese) [颜森林、迟泽英、陈文建、王泽农 2004 物理学报 **53** 1704]
- [8] Murakami A , Ohtsubo J 2002 *Phys. Rev. A* **65** 8261
- [9] Zhang S H , Shen K 2004 *Chin. Phys.* **13** 1215.
- [10] Zhu S Q , Lü X , Cheng X F 2000 *Chin. Phys.* **9** 337.
- [11] Fischer I , Liu Y , Davis P 2000 *Phys. Rev. A* **62** 8011
- [12] Liu Y , Chen H F , Liu J M , Davis P , Aidas T 2000 *Phys. Rev. A* **63** 8021
- [13] Uchida A , Liu Y , Davis P 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 963
- [14] Liu Y , Davis P , Takiguchi Y , Satio S , Liu J M 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 269
- [15] Liu Y , Chen H F , Liu J M , Davis P , Aida T 2001 *IEEE Trans Circuits Syst.* **48** 1484
- [16] Liu Y J , Qian X Z , Zhang X Z 2007 *Chin. Phys.* **16**
- [17] Miguel M S , Feng Q , Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A.* **52** 1728
- [18] Lu J G , Xi Y G 2005 *Chin. Phys.* **14** 274
- [19] Loiko Y V , Kulminkii A M , Voitovich A P 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1841
- [20] Sciamanna M , Masoller C , Abraham N B , Rogister F , Megret F , Blondel M 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 37
- [21] Spencer P S , Mirasso R C 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 803
- [22] Spencer P S , Mirasso R C , Colet P , Shore K A 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1673
- [23] Yu S F , Shum P , Ngo N Q 2001 *Opt. Commun.* **200** 143
- [24] Torre M S , Masoller C , Shore K A 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 1772
- [25] Hong Y , Won M , Spencer P S , Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 1215
- [26] Lee M W , Hong Y , Shore K A 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2392
- [27] Martin-Regalado J , Prati F , Miguel M S , Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [28] Giudici M , Balle S , Ackemanu T 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 2114
- [29] Masoller C , Abraham N B 1999 *Phys. Rev. A* **59** 3021
- [30] Ju R , Spencer P S , Shore K A 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 1461
- [31] Pecora L M , Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821

Vectorial chaotic synchronization characteristics of unidirectionally coupled and injected vertical-cavity surface-emitting lasers based on optical feedback^{*}

Zhong Dong-Zhou^{1)†} Xia Guang-Qiong²⁾ Wang Fei³⁾ Wu Zheng-Mao²⁾

¹⁾ School of Informatics, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

²⁾ School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

³⁾ School of Mathematic and Science, Chongqing Institute of Technology, ChongQing 400050, China)

(Received 28 July 2006 ; revised manuscript received 28 October 2006)

Abstract

Based on the Spin Flip Model (SFM), vectorial chaotic synchronization characteristics of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers (VCSELs) with isotropic optical feedback is numerically investigated. The results are as follows. First, when the external cavity round-trip time equals the propagation time of light from the transmitter to the receiver, both the x -linear polarization (LP) mode and the y -LP mode can realize very high complete synchronization. Second, when external cavity round-trip time is not equal to the propagation time and μ is near the lasing threshold, the better completely synchronized quality of the dominant y -LP mode can be temporarily achieved. In comparison, the governing x -LP mode can only realized poor synchronization quality. In addition, with the system governed by the mixed LP modes, each LP mode can obtain inferior synchronization quality. However, with injection current much greater than the threshold current, the completely governed y -LP mode can steadily achieve the best chaotic synchronization quality. At last, each LP mode of the injection can achieve good injection-locking synchronization with that of the receiver. While each dominant LP mode can obtain poorer injection-locking synchronization quality than the corresponding suppressed LP mode, with equal power, two LP modes both can achieve almost identical high injection-locking synchronization quality. Namely, the LP state with less power can be obtain better injection-locking synchronization.

Keywords : linearly polarized state, vertical-cavity surface-emitting laser, complete vector synchronization, strong injection-locking synchronization

PACC : 4265T 4260B

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing, China (Grant No. 2006 BB2331, 2005 BB3099).

[†] E-mail : dream_yu2002@126.com