

互注入垂直腔表面发射激光器的多次偏振转换特性研究

周桢力 夏光琼 邓涛 赵茂戎 吴正茂

Multiple polarization switching in mutually coupled vertical-cavity surface emitting lasers

Zhou Zhen-Li Xia Guang-Qiong Deng Tao Zhao Mao-Rong Wu Zheng-Mao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024208 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于外光注入互耦合垂直腔面发射激光器的混沌随机特性研究

Chaotic randomness of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting laser by optical injection

物理学报.2015, 64(2): 024209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024209>

基于次谐波调制光注入半导体激光器获取窄线宽微波信号的实验研究

Acquiring narrow linewidth microwave signals based on an optical injection semiconductor laser under subharmonic microwave modulation

物理学报.2014, 63(24): 244204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244204>

多波长红外激光二极管峰值光谱热漂移研究

Research on spectral peaks thermal-drifting in multi-wavelength infrared laser diode

物理学报.2014, 63(15): 154206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154206>

短外腔偏振旋转光反馈下 1550 nm 垂直腔面发射激光器的动力学特性研究

Dynamic characteristics of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser subject to polarization-rotated optical feedback: the short cavity regime

物理学报.2014, 63(1): 014203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014203>

表面液晶-垂直腔面发射激光器温度特性的研究

Temperature characteristics of VCSEL with liquid crystal overlay

物理学报.2013, 62(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234206>

互注入垂直腔表面发射激光器的多次偏振转换特性研究*

周桢力 夏光琼 邓涛 赵茂戎 吴正茂†

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2014年6月10日收到; 2014年7月4日收到修改稿)

基于垂直腔表面发射激光器 (VCSELs) 的自旋反转模型, 研究了互注入 VCSELs 系统中参数连续变化所引起的多次偏振转换 (PS) 特性. 研究表明: 连续改变互注入强度 ξ 、两个互注入 VCSELs 中一个激光器的激射频率以及同时连续改变两个激光器的激射频率, 均可产生多次的 PS. 详细分析了上述三种参数连续变化所引起的多次 PS 的特性, 并讨论了耦合延时时间对多次 PS 特性的影响.

关键词: 垂直腔表面发射激光器, 偏振转换, 互注入

PACS: 42.55.Px, 42.25.Ja, 42.65.Pc

DOI: 10.7498/aps.64.024208

1 引言

垂直腔表面发射半导体激光器 (VCSELs) 在光注入、光反馈及光电反馈等外部扰动下可呈现出丰富的非线性动力学行为, 这些非线性动力学行为因其在光通信、光存储、光互连、光信号处理等诸多方面所具有的潜在应用前景而受到相关领域学者和业界的广泛关注^[1-6]. 与边发射半导体激光器不同, 由于 VCSELs 中增益介质具有弱的各向异性, 从而导致 VCSELs 中可能存在两个相互正交的偏振分量. 通过改变 VCSELs 的工作参量, 可使其中占主导的偏振分量被抑制, 而与之正交的、原本被抑制的偏振分量被激发, 这种两个正交的偏振分量之间的主导位置的转换被称为偏振转换 (PS)^[7].

光注入、互注入、光反馈以及光电反馈等外部扰动常被引入到半导体激光器中以改变激光器的输出动力学特性^[8-11]. 近 10 多年来, 关于 VCSELs 在不同外部扰动下的 PS 现象已有不少研究报道^[12-27], 其中有一些研究专注于多次 PS 现

象^[23-27]. 例如, Valle 等^[23] 理论研究了反馈延时对弱光反馈下偏置电流连续变化所引发的多次 PS 的影响; Besnard 等^[24] 从理论和实验上分析了各向同性光反馈下电流引发的多次 PS 现象; Hong 等^[25] 与 Masoller 和 Torre^[26] 分别从实验和理论上研究了偏振选择光反馈下电流引发的多次 PS 特性. 我们注意到, 在相关的报道中, VCSELs 中呈现的多次 PS 现象大多是由电流引发的, 而关于电流以外的其他系统参量连续变化所导致的多次 PS 现象的研究很少^[27]. 由于在一个互注入 VCSELs 系统中, 耦合参量和两个 VCSELs 的中心频率是影响其动力学状态的关键参量, 同时也是在实际应用过程中便于控制的参量. 基于此, 本文拟探究互注入 VCSELs 系统中上述参量的连续变化所引发的多次 PS 特性.

本文基于互注入下 VCSELs 的自旋反转模型 (SFM), 理论研究了连续改变互注入强度 ξ 、两个互注入 VCSELs 中一个激光器的激射频率以及同时连续改变两个激光器的激射频率所引起的多次 PS 的特性, 并分析了耦合延时时间对其的影响.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178011, 61275116, 61475127) 和重庆市自然科学基金 (批准号: 2012jjB40011) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

2 理论模型

基于 SFM^[3], 描述互注入系统中的两个 VCSELs 的速率方程可表示为^[28]

$$\begin{aligned} \frac{dE_{1,2}^x}{dt} = & k(1+i\alpha)(N_{1,2}E_{1,2}^x - E_{1,2}^x + in_{1,2}E_{1,2}^y) \\ & - (\gamma_a + i\gamma_p)E_{1,2}^x + \xi E_{2,1}^x(t-\tau)e^{-i\omega_0\tau} \\ & \mp i\Delta\omega E_{1,2}^x + F_{1,2}^x, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{1,2}^y}{dt} = & k(1+i\alpha)(N_{1,2}E_{1,2}^y - E_{1,2}^y - in_{1,2}E_{1,2}^x) \\ & + (\gamma_a + i\gamma_p)E_{1,2}^y + \xi E_{2,1}^y(t-\tau)e^{-i\omega_0\tau} \\ & \mp i\Delta\omega E_{1,2}^y + F_{1,2}^y, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{1,2}}{dt} = & -\gamma_e N_{1,2} \left(1 + |E_{1,2}^x|^2 + |E_{1,2}^y|^2\right) + \gamma_e \mu \\ & - i\gamma_e n_{1,2} (E_{1,2}^y E_{1,2}^{x*} - E_{1,2}^x E_{1,2}^{y*}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_{1,2}}{dt} = & -\gamma_s n_{1,2} - \gamma_e n_{1,2} \left(|E_{1,2}^x|^2 + |E_{1,2}^y|^2\right) \\ & - i\gamma_e N_{1,2} (E_{1,2}^y E_{1,2}^{x*} - E_{1,2}^x E_{1,2}^{y*}), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 上标 x 和 y 分别代表 X 和 Y 方向上的偏振分量; 下标 1 和 2 代表 VCSEL1 和 VCSEL2; E 表示光场慢变复振幅; N 为总的载流子密度; n 为两个自旋反转载流子密度的差值; k 为光场衰减率; γ_e 为总的载流子衰减率; α 为线宽增强因子; γ_s 为自旋反转速率; γ_a, γ_p 分别为有源介质的线性色散效应和双折射效应; μ 为归一化的注入电流; τ 为耦合延迟时间; ξ 为耦合强度; $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$, ω_1 和 ω_2 分别表示 VCSEL1 和 VCSEL2 的角频率为平均角频率; $\Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)/2$ 为频率失谐. F 为自发辐射噪声, 表示为

$$\begin{aligned} F_{1,2}^x = & \sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}} \left(\sqrt{N_{1,2} + n_{1,2}\chi_{1,2}^1} \right. \\ & \left. + \sqrt{N_{1,2} - n_{1,2}\chi_{1,2}^2} \right), \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} F_{1,2}^y = & -i\sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}} \left(\sqrt{N_{1,2} + n_{1,2}\chi_{1,2}^1} \right. \\ & \left. - \sqrt{N_{1,2} - n_{1,2}\chi_{1,2}^2} \right), \end{aligned} \quad (5b)$$

其中 β_{sp} 为自发辐射速率, χ 为具有零平均值和归一化的高斯白噪声.

3 结果与讨论

利用四阶龙格-库塔法对速率方程(1)–(4)进行数值求解, 数值仿真过程中所用到的参数取值

如下^[29]: $\alpha = 2.2$, $k = 125 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_e = 0.67 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = 0.06 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 192 \text{ ns}^{-1}$, $\beta_{sp} = 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$. 采用上述参数值, VCSEL 自由运行时的功率-电流 (P - I) 曲线如图 1 所示. 图中虚线表示 X 方向上偏振分量的输出功率, 实线表示 Y 方向偏振分量的输出功率. 从图中可以看出: 该 VCSEL 自由运行时输出主要为 Y 偏振分量, 而 X 偏振分量被抑制. 在下面的讨论中, 我们假定 VCSEL1 和 VCSEL2 的归一化电流均为 1.5.

为了更好地分辨 PS 现象, 我们采用归一化功率, 定义为

$$P_{1,2}^x = |E_{1,2}^x|^2 / (|E_{1,2}^x|^2 + |E_{1,2}^y|^2), \quad (6a)$$

$$P_{1,2}^y = |E_{1,2}^y|^2 / (|E_{1,2}^x|^2 + |E_{1,2}^y|^2), \quad (6b)$$

其中, 功率值为激光器输出功率在 $1 \mu\text{s}$ 内的平均值. 考虑到 $P_{1,2}^x + P_{1,2}^y = 1$, 即归一化 X 和 Y 偏振分量功率值是互补的. 因此, 在之后的讨论中, 我们只对 X 偏振分量进行讨论.

下面对三种情况下的 PS 特性进行讨论: 1) 连续变化耦合强度引起的多次 PS; 2) 连续变化其中一个激光器 (VCSEL2) 的激射频率引起的多次 PS; 3) 同时连续变化两个 VCSELs 的激射频率而引起的多次 PS.

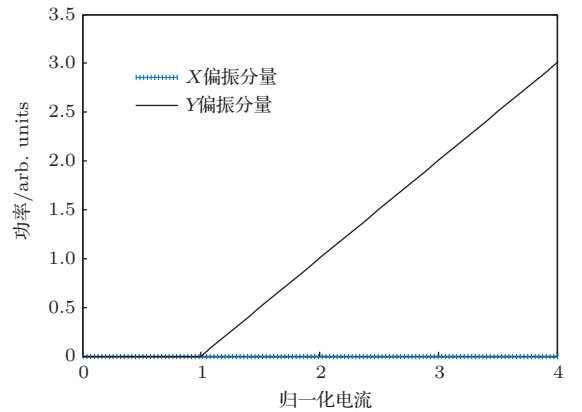


图 1 自由运行时 VCSEL 的功率-电流曲线

3.1 连续变化耦合强度引起的多次 PS

首先假定 VCSEL1 与 VCSEL2 具有完全一样的参数, 并假定 $\omega_2 = \omega_1 = 1.2216 \times 10^{15} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (相应的波长为 1543 nm). 图 2 给出了 VCSEL1 中 X 偏振分量归一化功率随 ξ 的变化关系, 其中图 2(a)–(d) 分别对应 $\tau = 0.2, 0.5, 0.8, 1.1 \text{ ns}$. 从图中可以看出: 在所考查的 ξ 范围内 (0 – 20 ns^{-1}),

连续变化 ξ 所引起的多次PS之间的间隔比较均匀, τ 较小时, PS比较稀疏, 而 τ 较大时, PS相对密集. 另外, 计算结果还表明, 对于给定的 τ 值, 能发生PS的 ξ 存在一个极大值 ξ_{\max} . ξ_{\max} 随 τ 的变化关系如图3所示. 从图中可以看出: 随着 τ 的增大,

ξ_{\max} 总体呈现减小的趋势. 在 $\tau < 0.8$ ns范围内, ξ_{\max} 呈现单调快速下降的趋势; 而当 $\tau > 0.8$ ns, 随着 τ 的增加, ξ_{\max} 总体呈缓慢减小趋势, 并伴随着波动. 由于此时具有完全对称的结构, 因此VCSEL2所呈现的多次PS与VCSEL1是相同的.

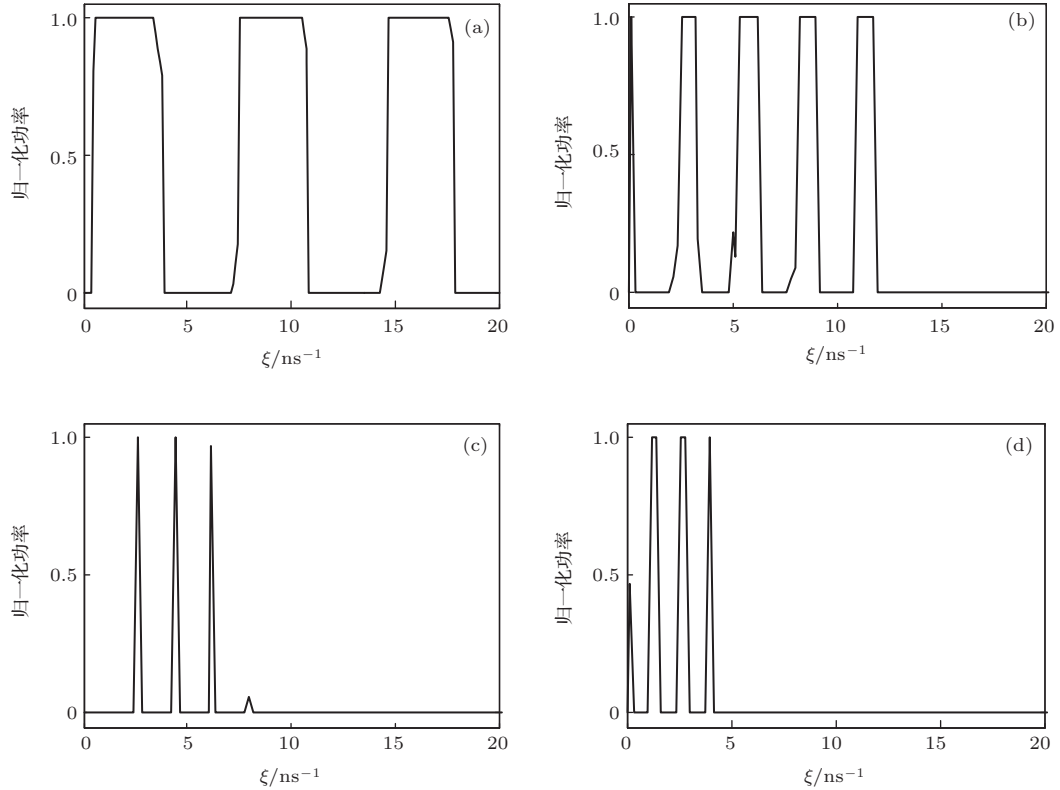


图2 $\omega_1 = \omega_2 = 1.2216 \times 10^{15}$ rad·s⁻¹时, VCSEL1中X偏振分量归一化功率随 ξ 的变化关系 (a)—(d)分别对应 $\tau = 0.2, 0.5, 0.8, 1.1$ ns

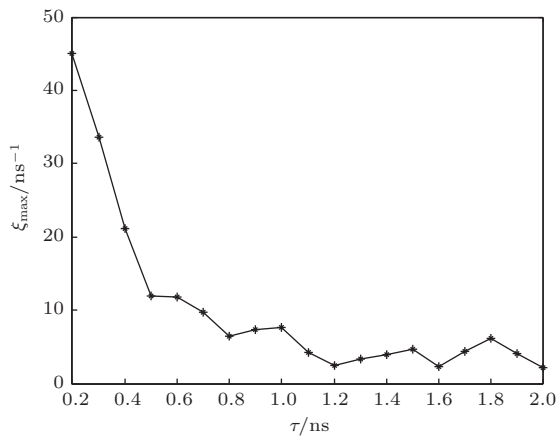


图3 ξ_{\max} 随 τ 的变化关系

上述结果是在两个VCSELs的激光频率相同的条件下得到的, 此时系统具有完全对称的结构. 接下来讨论两个VCSELs具有不同激光频率的情形. 由于在方程(1)—(4)中我们定义了

$\Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)/2$, 即 $\omega_2 = \omega_1 + 2\Delta\omega$. 如果我们假定VCSEL1的激光频率 ω_1 保持不变, 此时 ω_2 可通过 $\Delta\omega$ 进行表征. 图4给出了 $\Delta\omega = 50$ GHz时, VCSEL1和VCSEL2中X偏振分量归一化功率随 ξ 的变化关系, 其中图4(a)—(d)分别对应 $\tau = 0.2, 0.5, 0.8, 1.1$ ns. 从图中可以看出: 随着 τ 的增大, 连续变化 ξ 所引发的多次PS将更加密集, 这一性质与 $\Delta\omega = 0$ (如图2所示)时是相同的; 但与 $\Delta\omega = 0$ 所得结果(如图2所示)不同的是, 由于此时两个VCSELs存在频率差异, 即系统不再具有完全对称的结构, 因此两个激光器所呈现的多次PS将不再一致; 在相同的耦合延时下, $\Delta\omega = 50$ GHz时所得到的多次PS之间的间隔比 $\Delta\omega = 0$ GHz时所得到的多次PS的间隔大; 多次PS的均匀性比 $\Delta\omega = 0$ GHz时差, 且PS的上升沿和下降沿不如 $\Delta\omega = 0$ GHz时的陡峭.

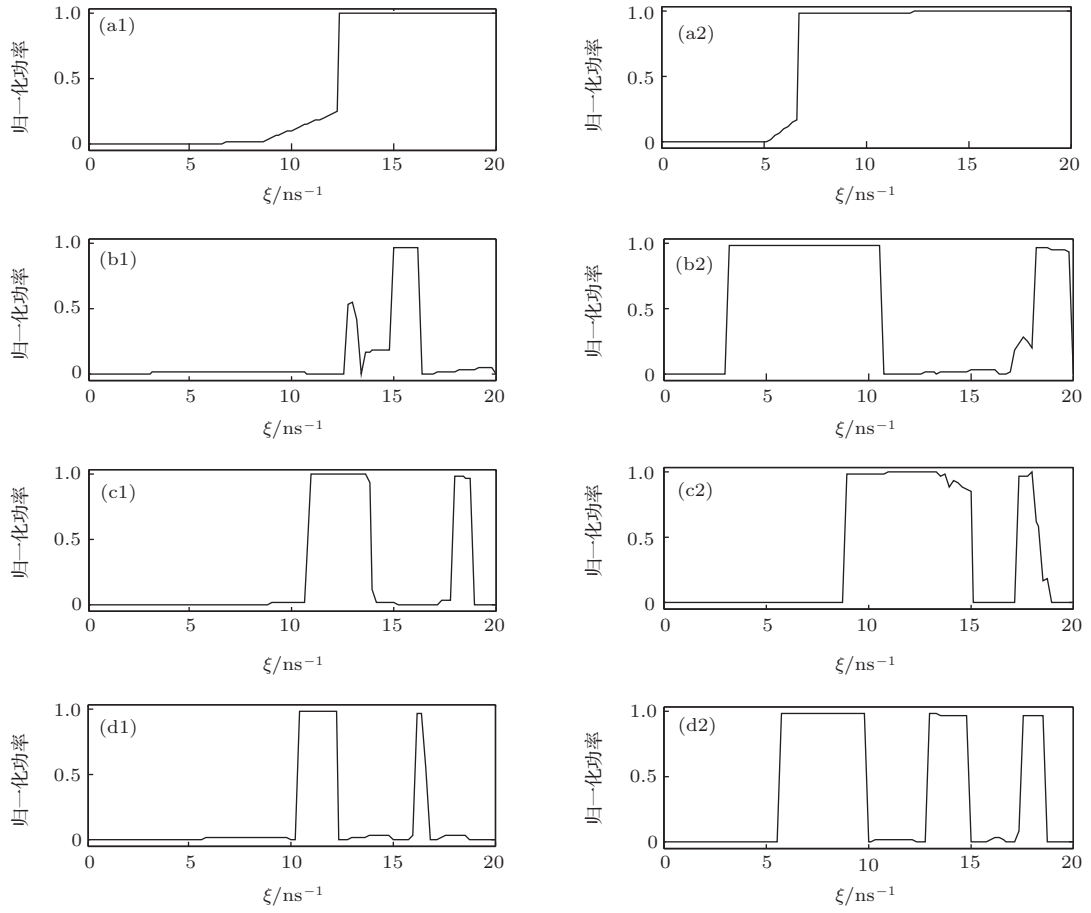


图4 $\Delta\omega = 50$ GHz时, VCSEL1, VCSEL2中 X 偏振分量归一化功率随 ξ 的变化 (a)–(d) 分别对应 $\tau = 0.2, 0.5, 0.8, 1.1$ ns; (a1)–(d1) VCSEL1; (a2)–(d2) VCSEL2

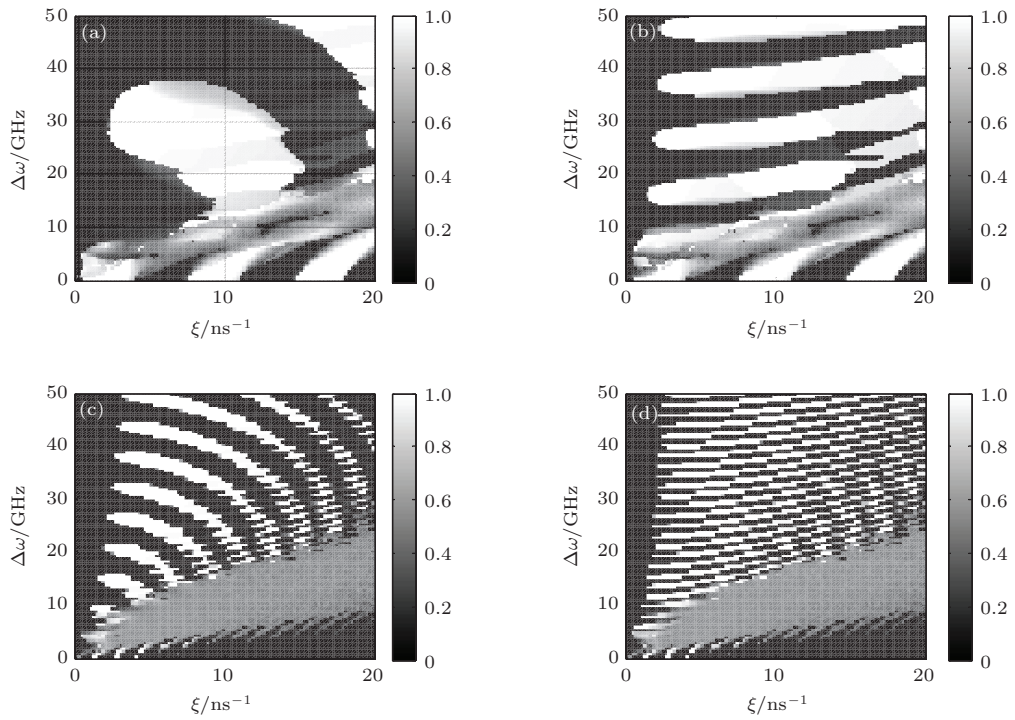


图5 $\Delta\omega$ 取不同值时, VCSEL1, VCSEL2中 X 偏振分量归一化功率随 ξ 的变化 (a) VCSEL1, $\tau = 0.2$ ns; (b) VCSEL2, $\tau = 0.2$ ns; (c) VCSEL1, $\tau = 1.1$ ns; (d) VCSEL2, $\tau = 1.1$ ns

为了更好地说明 $\Delta\omega$ 对连续改变 ξ 所引起的多次 PS 特性的影响, 我们把 $\Delta\omega$ 取不同值时所得到的连续变换 ξ 所引起的多次 PS 汇集在一起, 所得结果如图 5 所示. 图 5(a), (b) 为 $\tau = 0.2$ ns, (c), (d) 为 $\tau = 1.1$ ns. 从图中可以看出: 两个激光器中 X 偏振分量的归一化功率存在一个既不接近于 0 也不接近于 1 的区域, 如图中浅灰色部分所示, 此时, X, Y 偏振分量都同时存在, 即激光器输出不再表现为线偏振模式, τ 值越大, 该区域越宽阔. 通过仔细观察图 5 还可发现, 在 X, Y 偏振分量都同时存在的区域的下侧, 此时 $\Delta\omega$ 相对较小, VCSEL1 和 VCSEL2 的输出呈现相同的多次 PS 特性; 而在 X, Y 偏振分量都同时存在的区域的上侧, 此时 $\Delta\omega$ 相对较大, 导致 VCSEL1 和 VCSEL2 的输出呈现不同的多次 PS 特性. 此外, 进一步的模拟结果还表明, 随着 $\Delta\omega$ 的增加, 能发生 PS 的最大 ξ (ξ_{\max}) 将逐渐增加.

3.2 连续改变其中一个 VCSEL 的激光频率引起的多次 PS

我们假定 VCSEL1 的输出频率依然为一个固定值 1.2216×10^{15} rad·s⁻¹, 由于 $\omega_2 = \omega_1 + 2\Delta\omega$, 因此 $\Delta\omega$ 值的变化就表征了 ω_2 的变化. 图 6 给出了 $\xi = 5$ ns⁻¹, 耦合延时时间取不同值时两个 VCSELs 中 X 偏振分量的归一化功率随 $\Delta\omega$ 的变化关系, 其中图 6(a)–(d) 分别对应 $\tau = 0.2, 0.5, 0.8, 1.1$ ns. 从图中可以看出: $\Delta\omega$ 的连续变化也会导致多次 PS 的发生, 且两个激光器之间的 PS 特性具有非常明显的区别. 其中 VCSEL1 (激光频率相对较小) 中的多次 PS 比 VCSEL2 (激光频率相对较大) 中的多次 PS 更稀疏. $\Delta\omega$ 值越大将更利于获得边缘陡峭的 PS. 同时, $\Delta\omega$ 值较大的区域, 连续变化 VCSEL2 的激光频率所引起的多次 PS 的间隔近似相等, 即呈现周期性的 PS. 另外, τ 越大, PS 越密集.

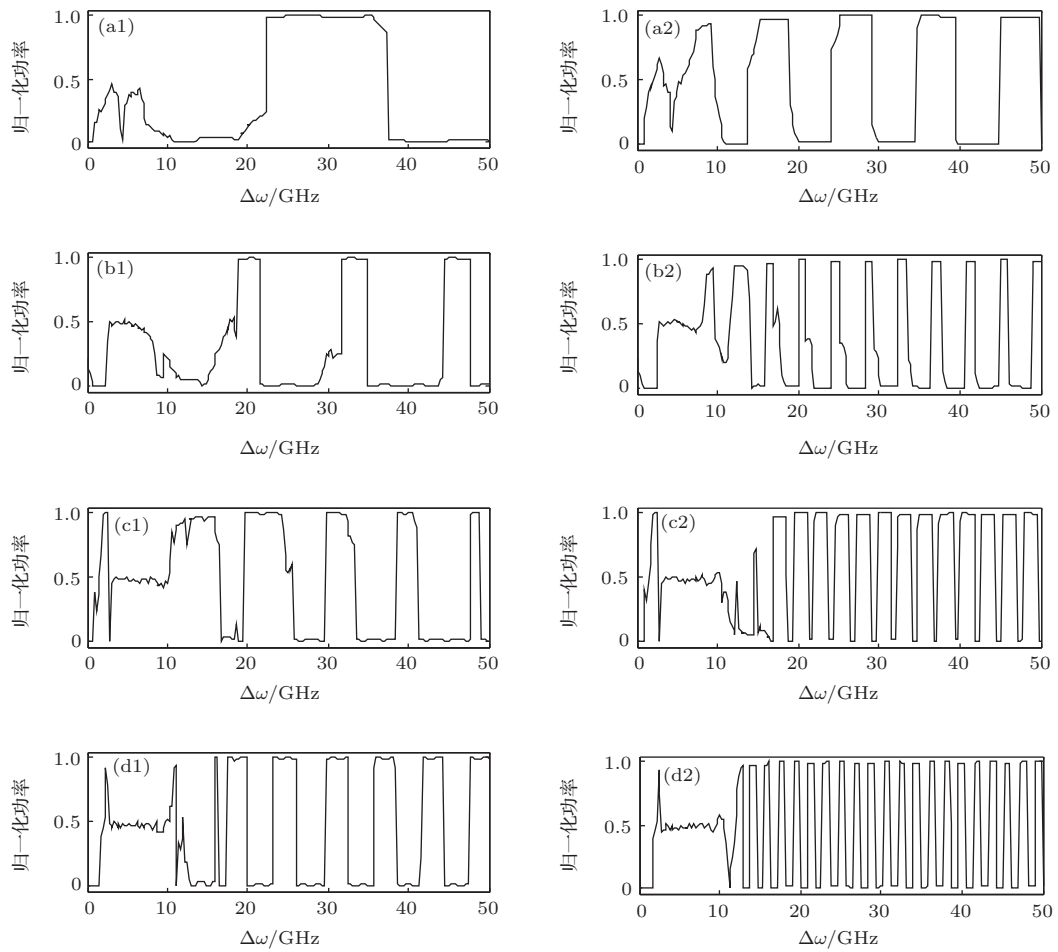


图 6 $\xi = 5$ ns⁻¹ 时, VCSEL1, VCSEL2 中 X 偏振分量归一化功率随 $\Delta\omega$ 的变化关系 (a)–(d) 分别对应 $\tau = 0.2, 0.5, 0.8, 1.1$ ns; (a1)–(d1) VCSEL1; (a2)–(d2) VCSEL2

3.3 同时连续改变两 VCSELs 的激光频率引起的多次 PS

假定 VCSEL1 与 VCSEL2 具有相同激光频率, 讨论同时改变 VCSEL1 与 VCSEL2 的激光频率而引起的连续 PS 现象. 此时, $\Delta\omega = 0$, 而两个激光器的平均角频率 ω_0 将发生改变. 定义平均角频率 ω_0 相对于 $1.2216 \times 10^{15} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的变化量为 $\delta\omega_0$. 由

于此该系统具有严格的对称性, 因此两个激光器的 PS 特性是相似的, 因此我们只讨论 VCSEL1 中的 PS 特性. 图 7 给出了 $\xi = 5 \text{ ns}^{-1}$ 时, VCSEL1 中 X 偏振分量的归一化功率随 $\delta\omega_0$ 的变化关系, 其中图 7 (a)—(d) 分别对应 $\tau = 0.2, 0.5, 0.8, 1.1 \text{ ns}$. 从图中可以看出, 与前面所讨论两种多次 PS 相比, 连续变化 $\delta\omega_0$ 所引起的多次 PS 具有更好的周期性. τ 越大, 多次 PS 将越密集, 上升沿和下降沿越陡峭.

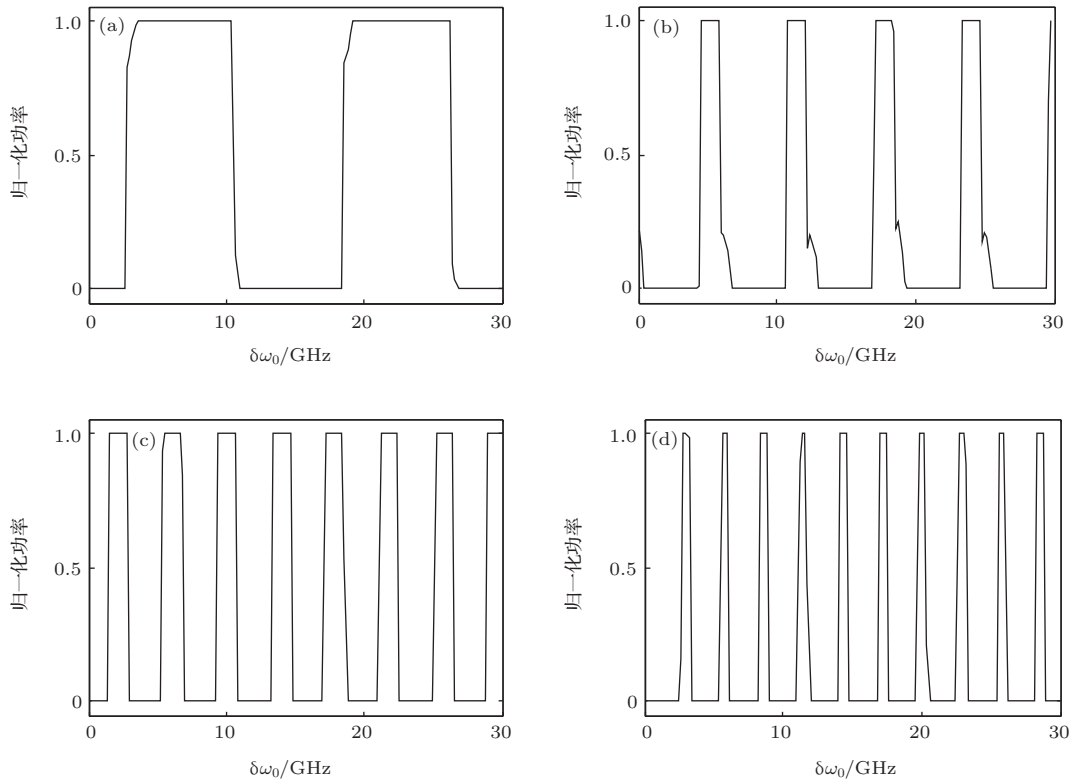


图 7 $\xi = 5 \text{ ns}^{-1}$ 时, VCSEL1 中 X 偏振分量归一化功率随 $\delta\omega_0$ 的变化关系 (a)—(d) 分别对应 $\tau = 0.2, 0.5, 0.8, 1.1 \text{ ns}$

4 结 论

基于 SFM, 研究了互注入 VCSELs 系统中几个重要参量连续改变所引起的多次 PS 特性. 研究结果显示: 连续变化 ξ 所引起的多次 PS 之间的间隔比较均匀, 能发生 PS 的 ξ 存在一个极大值 ξ_{max} , 其随着 τ 的增加总体呈现下降的趋势; 固定 VCSEL1 的激光频率, 连续变化 VCSEL2 的激光频率也会导致多次的 PS. 两个 VCSELs 呈现的 PS 特性具有非常明显的差异, 其中激光频率相对较小的激光器的 PS 更稀疏; 同时连续改变两个 VCSELs 的激光频率所得到的多次 PS 具有很好的周期性. 对于上述三种情形, 越大的耦合延时时间都将导致 PS 越

密集, PS 的上升沿和下降沿更陡峭. 在实际的应用过程中, 可根据具体需要, 选择合适的方式获取多次 PS. 需要说明的是, 考虑到长波长 VCSELs 的优越性能和潜在应用前景^[30], 本文研究所选取的参数为 1550 nm 波段 VCSEL 的典型参数. 而对于 850 nm 波段的短波长 VCSELs 而言, 我们的计算结果表明其多次 PS 特性与本文的结果有相似的变化规律.

参考文献

[1] Koyama F 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4502
 [2] Iga K 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 1201
 [3] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728

- [4] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [5] Zhong D Z, Deng T, Zheng G L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 070504 (in Chinese) [钟东洲, 邓涛, 郑国梁 2014 物理学报 **63** 070504]
- [6] Xiao P, Wu Z M, Wu J G, Jiang L, Deng T, Tang X, Fan L, Xia G Q 2013 *Opt. Commun.* **286** 339
- [7] Wang X F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104208 (in Chinese) [王小发 2013 物理学报 **62** 104208]
- [8] Wu L, Zhu S Q, Ni Y 2007 *Eur. Phys. J. D* **41** 349
- [9] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6878 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 6878]
- [10] Guo D M, Yang L Z, Wang A B, Zhang X J, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8275 (in Chinese) [郭东明, 杨玲珍, 王安邦, 张秀娟, 王云才 2009 物理学报 **58** 8275]
- [11] Liu Y Y, Pan W, Jiang N, Xiang S Y, Lin Y D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024208 (in Chinese) [刘莹莹, 潘炜, 江宁, 项水英, 林煜东 2013 物理学报 **62** 024208]
- [12] Bandyopadhyay S, Hong Y, Spencer P S, Shore K A 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 2395
- [13] Yang B X, Xia G Q, Lin X D, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1480 (in Chinese) [杨炳星, 夏光琼, 林晓东, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 1480]
- [14] Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 911
- [15] Jeong K H, Kim K H, Lee S H, Lee M H, Yoo B S, Shore K A 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 779
- [16] Deng T, Wu Z M, Xie Y Y, Wu J G, Tang X, Fan L, Panajotov K, Xia G Q 2013 *Appl. Opt.* **52** 3833
- [17] Li X J, Wu Z M, Deng T, Zheng A J, Xia G Q 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1214001 (in Chinese) [李小坚, 吴正茂, 邓涛, 郑安杰, 夏光琼 2012 光学学报 **32** 1214001]
- [18] Arteaga M A, Unold H J, Ostermann J M, Michalzik R, Thienpont H, Panajotov K 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 89
- [19] Zheng A J, Wu Z M, Deng T, Li X J, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234203 (in Chinese) [郑安杰, 吴正茂, 邓涛, 李小坚, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 234203]
- [20] Hong Y H, Paul J, Spencer P S, Shore K A 2008 *IEEE J. Quantum Electron.* **44** 30
- [21] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1276
- [22] Huang X B, Xia G Q, Wu Z M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3066 (in Chinese) [黄雪兵, 夏光琼, 吴正茂 2010 物理学报 **59** 3066]
- [23] Valle A, Pesquera L, Shore K A 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 639
- [24] Besnard P, Charès M L, Stéphan G, Robert F 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 1059
- [25] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 2151
- [26] Masoller C, Torre M S 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 483
- [27] Vicente R, Mulet J, Mirasso C R, Sciamanna M 2006 *Opt. Lett.* **31** 996
- [28] Mulet J, Masoller C, Mirasso C R 2002 *Phys. Rev. A* **65** 063815
- [29] Al-Seyab R, Schires K, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 1700512
- [30] Kapon E, Sirbu A 2009 *Nature Photon.* **3** 27

Multiple polarization switching in mutually coupled vertical-cavity surface emitting lasers^{*}

Zhou Zhen-Li Xia Guang-Qiong Deng Tao Zhao Mao-Rong Wu Zheng-Mao[†]

(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 10 June 2014; revised manuscript received 4 July 2014)

Abstract

Based on the spin-flip model, the characteristics of multiple polarization switching (PS) in mutually-coupled vertical-cavity surface emitting laser (VCSEL) are investigated by continuously changing some important parameters. The simulated results show that multiple PS can be generated through continuously varying the mutually-coupled strength, the oscillation frequency of one VCSEL or the oscillation frequencies of two VCSELs. The characteristics of multiple PS under the above three scenarios are analyzed, and the influence of the delay-coupled time on the performance of multiple PS is also discussed.

Keywords: vertical-cavity surface emitting lasers, polarization switching, mutual coupling

PACS: 42.55.Px, 42.25.Ja, 42.65.Pc

DOI: [10.7498/aps.64.024208](https://doi.org/10.7498/aps.64.024208)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178011, 61275116, 61475127), and the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant No. 2012jjB40011).

[†] Corresponding author. E-mail: zmwu@swu.edu.cn