

光电负反馈下垂直腔表面发射激光器偏振开关特性研究*

王小发[†]

(重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

(2012年11月16日收到; 2012年12月11日收到修改稿)

基于扩展的自旋反转模型, 对光电负反馈下垂直腔表面发射激光器的偏振开关特性进行了数值仿真和理论分析. 研究表明: 对于不同的自旋反转率, 反馈强度和延迟时间对激光器偏振开关特性产生较大影响. 在慢自旋反转率下运行时, 随着反馈强度的增加, 开关点电流呈线性增加, 导致 X 偏振模被压缩, 这与报道的基于各向同性光反馈的情景相反, 产生这一现象的原因是由于光电负反馈提高了 X 偏振模的阈值; 延迟时间对开关点电流的影响随反馈强度的变化而不同. 在快自旋反转率下运行时, 反馈强度对开关点电流的影响与慢自旋反转率时的情形不同, 开关点电流经历先增加后减小的过程, 开关点电流受反馈强度的影响更加敏感; 而延迟时间的影响规律和慢自旋反转率时相似. 此外, 还发现自发辐射噪声对激光器偏振开关特性有较大影响.

关键词: 垂直腔表面发射激光器, 偏振开关, 光电负反馈, 自发辐射噪声

PACS: 42.55.Px, 42.81.Gs, 42.65.Pc

DOI: 10.7498/aps.62.104208

1 引言

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, 因而近年来备受关注. 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^[1-30]. 1995 年, Miguel 等^[1]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.

VCSEL 开始起振时, 优先运行一个方向的线偏振模 (这里称之为 Y 方向), 随着偏置电流的增加, 输出光偏振态会转向与之垂直的方向 (X 方向), 这种偏振态之间的转换称为偏振开关 (PS) 现象, 这一过程中包括了许多复杂的动力学特征, 诸如: 两模

共存 (同时发射两相互正交的线偏振光), 偏振模跳变 (噪声引起两线偏振模式间的相互竞争), 椭圆偏振光 (两相互正交的线偏振光具有相同的频率). 由于 PS 现象对于保偏光应用领域来说至关重要, 因此受到了广泛关注^[2-8]. 目前, 控制 VCSEL 偏振光输出的方法很多: 其中一种方法是改变腔的结构^[9-11]; 另外的方法是通过施加外部扰动来实现, 常见的方式有偏振选择光反馈^[12,13]和各向同性光反馈^[14-16]、光注入^[17,18]、注入调制电流^[19], 以及光反馈和调制电流相结合^[20,21]等, 并在实验上得到了验证.

近年来, 由于光电反馈与光反馈相比具有操作灵活且对相位不敏感的特点, 利用光电反馈扰动 VCSEL 的输出动力学特性的研究也受到广泛关注^[22-24], 但是上述的讨论只是基于单一电流下的动态特性, 而对不同偏置电流下的光电负反馈诱发的 PS 特性研究还很少见. 鉴于此, 本文基于扩展的 SPM 模型, 数值研究了光电负反馈下 VCSEL 的 PS 特性, 发现光电负反馈对 VCSEL 的 PS 特性有重要

* 重庆邮电大学博士启动基金 (批准号: A2012-24) 和重庆邮电大学青年科学基金 (批准号: A2012-84) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wangxf@cqupt.edu.cn

影响, 所得结果与光反馈的情景进行了对比^[3], 并获得了一些新的结果.

2 系统模型

图 1 为光电负反馈下 VCSEL 的 PS 系统模型. VCSEL 输出的激光束经过分束器 (BS) 后分成两束, 一束光经过光电探测器 1 (PD1) 和宽带放大器 (A) 后产生反馈电流 (I_f), 通过反馈电流与偏置电流的减法运算后反馈回 VCSEL, 从而实现改变 VCSEL 的 PS 特性的作用; 另一束光经过偏振分束器 (PBS) 后, 分成两相互正交的线偏振光, 分别经过光电探测器 2 (PD2) 和光电探测器 3 (PD3) 后输入数字示波器 (Oscilloscope), 用于监测两线偏振光的波形和相对强度变化.

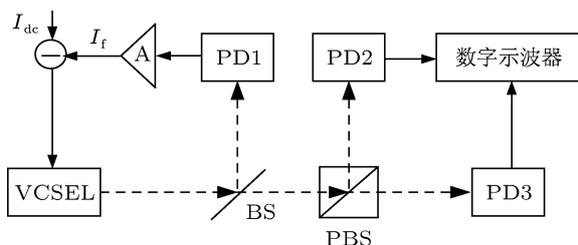


图 1 光电负反馈下 VCSEL 的 PS 系统模型

3 理论

根据 SFM^[1], 描述基于光电负反馈下 VCSEL 的速率方程为^[22-24]

$$\frac{dE_x}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N-1)E_x + inE_y] - (\gamma_a + i\gamma_p)E_x + \sqrt{\beta_{sp}/2}(\sqrt{N+n}\xi_1 + \sqrt{N-n}\xi_2), \quad (1)$$

$$\frac{dE_y}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N-1)E_y - inE_x] + (\gamma_a + i\gamma_p)E_y - i\sqrt{\beta_{sp}/2}(\sqrt{N+n}\xi_1 - \sqrt{N-n}\xi_2), \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = \gamma_N \left\{ \mu \left[1 - \eta \frac{P(t-\tau)}{P_0} \right] - N(1+P) - in(E_y E_x^* - E_x E_y^*) \right\}, \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma_n n - \gamma_N [nP + iN(E_y E_x^* - E_x E_y^*)], \quad (4)$$

其中, 下标 x, y 分别表示 X, Y 线偏振模, E 表示光场的慢变振幅, N 为总的载流子密度, n 为两自旋反转载流子密度的差值, τ 为光电反馈的延迟时间, k 为光场衰减率, α 为线宽增强因子, γ_s 为自旋反转

速率, γ_N 为总的载流子衰减率, γ_a 代表线性色散效应, γ_p 代表有源介质线性双折射效应, μ 为以阈值电流进行归一化后的注入电流, η 为光电反馈系数, $P = |E_x + E_y|^2$ 为归一化输出功率, P_0 为相应偏置电流下自由运行时的输出功率, β_{sp} 为自发辐射噪声强度, $\xi_{1,2}$ 为带零平和单位变量的高斯白噪声^[25].

4 结果与讨论

利用四阶 Runge-Kutta 方法对 (1)–(4) 式进行数值求解, 数值模拟中用到的参数取值如下^[21]: $\alpha = 3$, $k = 300 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_N = 1 \text{ ns}^{-1}$. 在光反馈下 VCSEL 的 PS 特性研究中, 普遍采用对偏置电流以一定速率进行扫描来寻找开关点电流 (μ_{PS}) 的方法^[3]. 光电负反馈与光反馈的方法相比存在一定的差异, 由于光电负反馈的反馈项 $\left[\eta \frac{P(t-\tau)}{P_0} \right]$ 中包含特定电流下自由运行时的功率值 (P_0), 在扫描偏置电流时, 需要对每个电流值下激光器自由运转时的输出功率进行修正, 因此计算过程相对复杂.

在各向同性光反馈下 VCSEL 的 SFM 模型中, 内部参数 ($\gamma_s, \gamma_a, \gamma_p$) 能够对 PS 特性产生重要影响^[3], 因此, 研究不同内部参数下的 PS 特性具有重要意义. 下面分别从慢自旋反转率和快自旋反转率两个方面来研究光电负反馈对 VCSEL 的 PS 特性的影响.

4.1 慢自旋反转率和大的线性色散系数

选择较慢的自旋反转率 ($\gamma_s = 50 \text{ ns}^{-1}$), 较大的线性色散系数 ($\gamma_a = 0.5 \text{ ns}^{-1}$), 以及较小的线性双折射系数 ($\gamma_p = 30 \text{ ns}^{-1}$) 进行数值分析. 在上述参数条件下, 自由运转的 VCSEL 优先激发 Y 偏振模, μ_{PS} 较低, 在 1.13 左右, 这种 PS 称为 I 型 PS^[21].

4.1.1 反馈强度对 PS 特性的影响

图 2 为 $\tau = 3 \text{ ns}$, 不同 η 时的 PS 特性. 其中图 2(a) 为不考虑噪声时的情景, 图 2(b) 为附加噪声以后的情景. 从图 2(a) 中可以看出, 无反馈时, μ_{PS} 在 1.13 左右, 随着 η 从 0.001 增加到 0.006, μ_{PS} 的位置也逐渐向大电流方向移动, 也就是说, 初始起主导作用的 Y 偏振模会移上更高的电流下运行, 而 X 偏振模会逐渐向高电流方向收缩, 这相当于压缩了 X 偏振模, 这种现象与已经报道的各向同性光反馈的情况恰好相反 (各向同性光反馈会使优先起振的偏振模被压缩)^[13], 这提供了另一种控制偏振模输

出的方法. 此外, 增加 η 会使开关点附近的偏振模竞争现象加剧, 偏振模竞争区域变宽, 这与光反馈的情况类似^[3]. 图 2(b) 为附加自发辐射噪声后的情景, 从图中可以看出, 无反馈时 μ_{PS} 不受影响, 随着反馈强度的增加, 两偏振模竞争非常激烈, 在较大反馈强度下, 整个电流范围内都呈两模共存状态, 导致 PS 现象完全消失. 因此, 在光电负反馈情况下, 噪声对 PS 特性的影响是巨大的, 在实际应用中应采取过滤或降低噪声源强度.

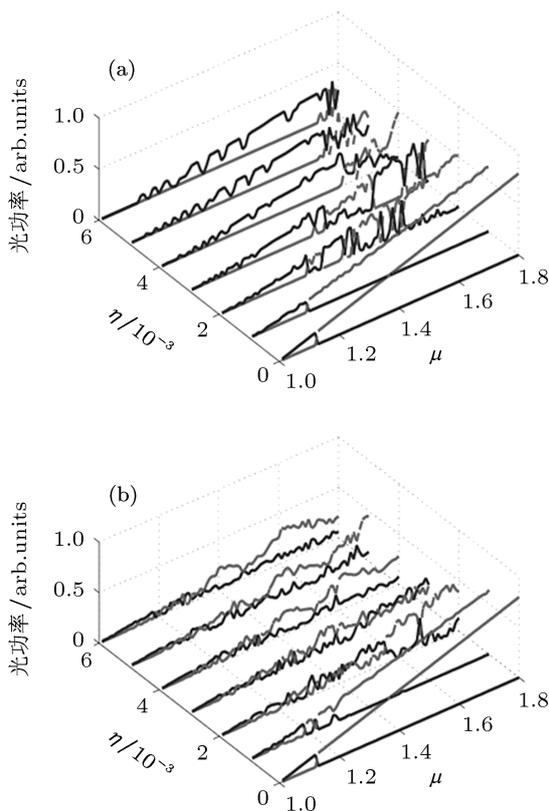


图 2 $\tau = 3$ ns, 不同 η 时的 PS 特性 (a) 表示不考虑噪声时的情景; (b) 表示考虑自发辐射噪声 ($\beta_{sp} = 1 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$) 时的情景^[25] (其中实线代表 Y 偏振模, 虚线代表 X 偏振模)

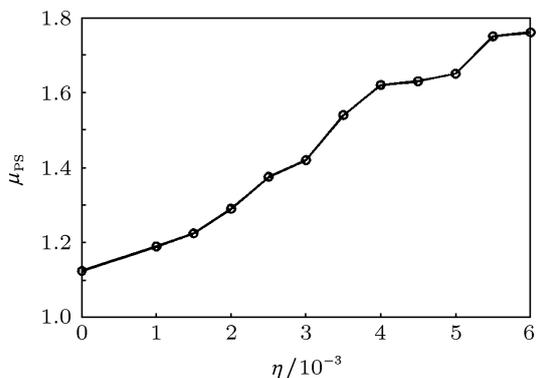


图 3 无噪声时, μ_{PS} 随 η 的变化关系

图 3 为无噪声时 μ_{PS} 随 η 的变化关系图. 从图中可以看出, 随着 η 由 0 增加到 0.006, μ_{PS} 逐渐从 1.13 增加到 1.78 左右, μ_{PS} 增加的幅度达到 0.65, 这为偏振态的控制提供了相对大的电流调谐空间.

4.1.2 延迟时间对 PS 特性的影响

VCSEL 运行在偏振选择光反馈时, τ 对 VCSEL 的 PS 特性有较大影响^[3]. 因此, 在光电负反馈下, 也有必要考虑 τ 对 PS 特性的影响.

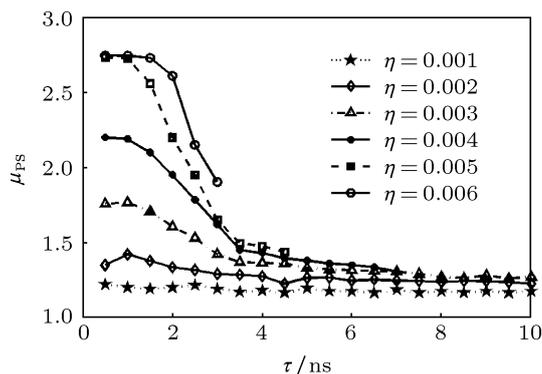


图 4 为不同 η 时 μ_{PS} 随 τ 的变化关系

图 4 为不同 η 时 μ_{PS} 的位置随 τ 的变化关系图. 从图中可以看出, 在小的 η (0.001—0.002) 时, τ 对 μ_{PS} 的影响较小. 随着 η 的增加, 在 τ 小于 2.5 ns 的区域内, μ_{PS} 会逐渐增加. 当 η 增加到 0.004 时, τ 超过 7 ns 后, PS 现象会逐渐消失. 继续增加 η , PS 现象消失时的 τ 值会逐渐变小. 当 η 为 0.006 时, $\tau = 3$ ns 时就会出现 PS 消失现象. 此外, $\eta \geq 0.003$ 时, μ_{PS} 会随着 τ 的增加而减小; η 越大, μ_{PS} 随着 τ 的增加衰减会越剧烈, 这一规律和偏振选择光反馈的情景非常类似^[3].

图 5 为 $\eta = 0.006$, 不同 τ 值时的 PS 特性. 从图 5(a) 中可以看出, 在 $\tau = 1$ ns 时, μ_{PS} 为 2.75 左右; 随着 τ 增加到 2 ns, μ_{PS} 会下降到 2.5, 如图 5(b) 所示; 继续增加到 $\tau = 3$ ns, μ_{PS} 会迅速下降到 1.75 左右. 当 $\tau = 4$ ns 时, PS 现象消失, 此时两偏振模竞争现象非常剧烈. 此外, 随着 τ 的增加, VCSEL 的运行阈值也会逐渐升高.

4.2 快自旋反转率和小的线性色散系数

选择快的自旋反转率 ($\gamma_s = 500 \text{ ns}^{-1}$), 小的线性色散系数 ($\gamma_a = 0.18 \text{ ns}^{-1}$), 以及大的线性双折射系数 ($\gamma_b = 157 \text{ ns}^{-1}$) 进行 PS 特性的对比分析^[3], 在上述参数条件下, VCSEL 自由运行时的 μ_{PS} 较高, 在 1.45 左右.

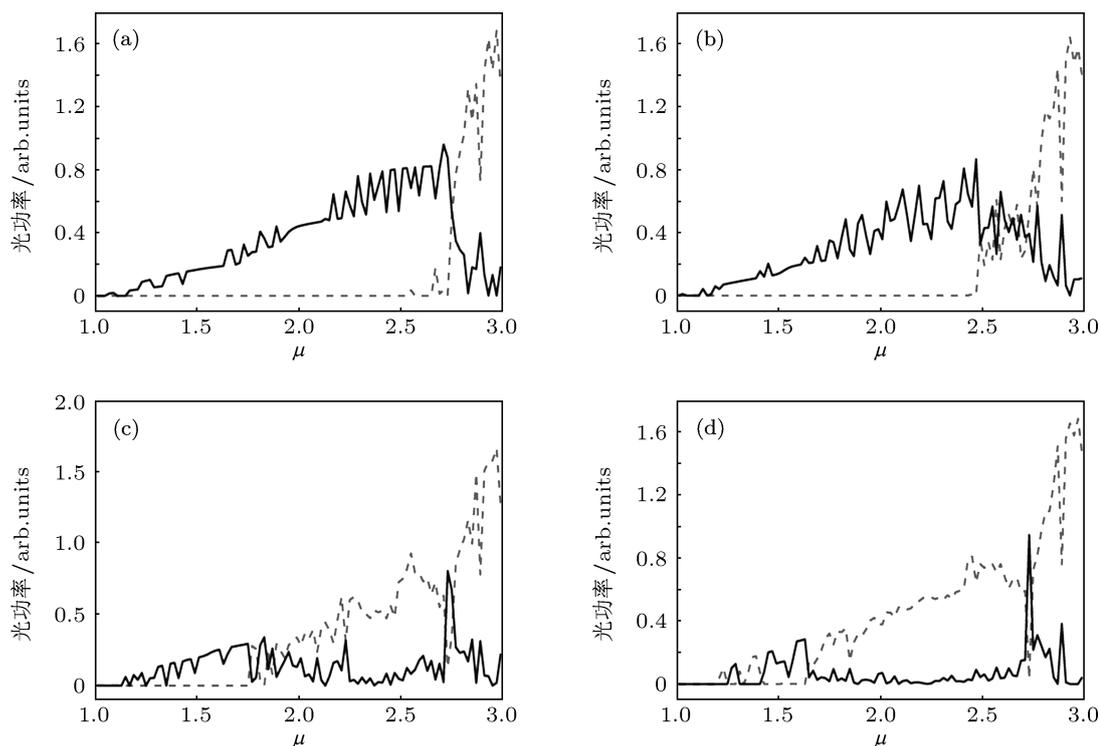


图5 $\eta = 0.006$, τ 分别为 (a) 1 ns, (b) 2 ns, (c) 3 ns, (d) 4 ns 时的 PS 特性 (其中实线代表 Y 偏振模, 虚线代表 X 偏振模)

4.2.1 反馈强度对 PS 特性的影响

图 6 为 $\tau = 3$ ns, 不同 η 时 VCSEL 的 PS 特性. 从图 6(a) 中可以看出, 不考虑噪声项时, η 值与慢自旋反转率时的情景相比, 从 10^{-3} 量级降低到 10^{-6} 量级, 也就是说, 快自旋反转率时的情景对 η 值更加敏感. 而且, μ_{PS} 随着 η 的增加先逐渐增加后又迅速减少, 这与慢自旋反转率时 μ_{PS} 一直增加的规律也存在较大差别. 引入噪声项后, 如图 6(b) 所示, 噪声使得 PS 现象迅速消失, 在较大的 η 时, 整个电流区域内呈现两偏振模竞争的特点, 这与慢自旋反转率时的情景相同.

图 7 为无噪声时, μ_{PS} 随 η 的变化关系. 从图中可以看出, 随着 η 的增加, μ_{PS} 出现复杂的变化. 在 $\eta = 0 - 0.8 \times 10^{-6}$ 范围内, μ_{PS} 呈线性增加的趋势; 而 η 在 $(0.8 - 1.4) \times 10^{-6}$ 范围内, μ_{PS} 迅速减小, 整个 η 范围内, μ_{PS} 增加幅度为 0.25, 与慢自旋反转率时相比要小得多.

4.2.2 延迟时间对 PS 特性的影响

对快自旋反转率的情形下 τ 对 PS 特性的影响

也做了分析.

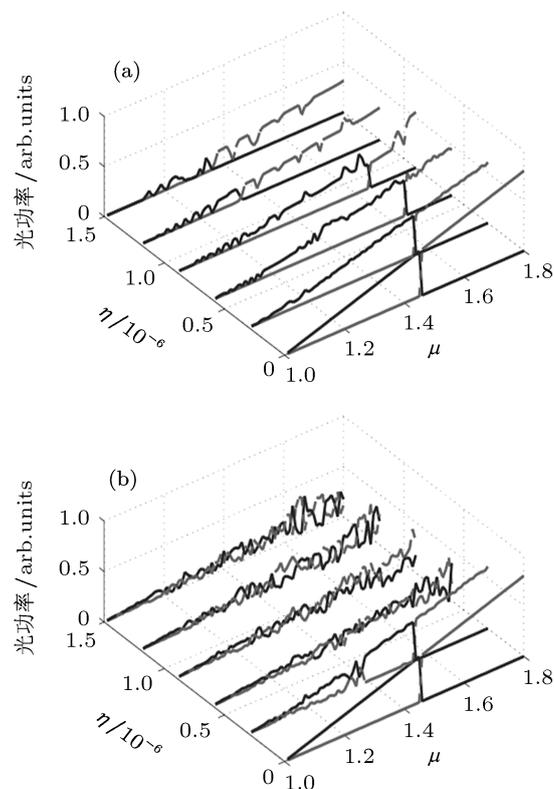


图6 $\tau = 3$ ns, 不同 η 时 VCSEL 的 PS 特性 (a) 无噪声时的情景; (b) 附加噪声项后的情景 ($\beta_{sp} = 1 \times 10^{-6} \text{ ns}^{-1}$); 其中实线代表 Y 偏振模, 虚线代表 X 偏振模

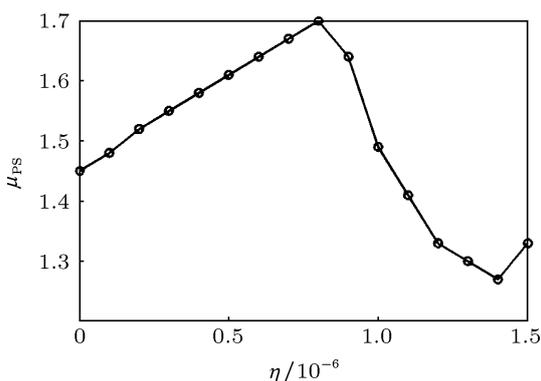


图7 无噪声时, μ_{PS} 随 η 的变化关系

图8为不同 η 时 μ_{PS} 随 τ 的变化关系. 从图中可以看出, 在较低的 η ($(0.3-0.6) \times 10^{-6}$) 时, μ_{PS} 随着 τ 的增加变化较小. 当 η 增加到 0.9×10^{-6} 时,

在 $\tau \leq 1.5$ ns 区域内, μ_{PS} 有所下降. 当 τ 在 (1.5—9 ns) 的范围内增加时, μ_{PS} 缓慢减小, 而当 $\tau \geq 9$ ns 后, PS 现象消失. 当 η 在 $(1.2-1.5) \times 10^{-6}$ 范围内, PS 现象只出现在 τ 很小的范围内 (小于 5 ns).

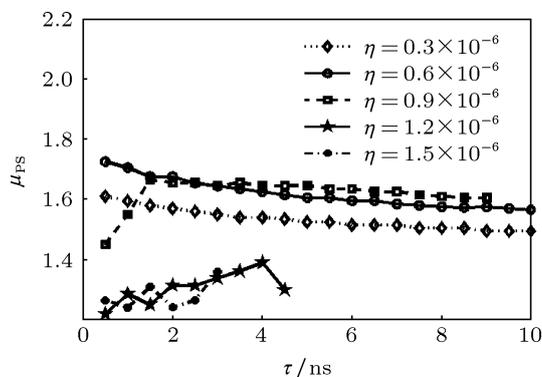


图8 不同 η 时 μ_{PS} 随 τ 的变化关系

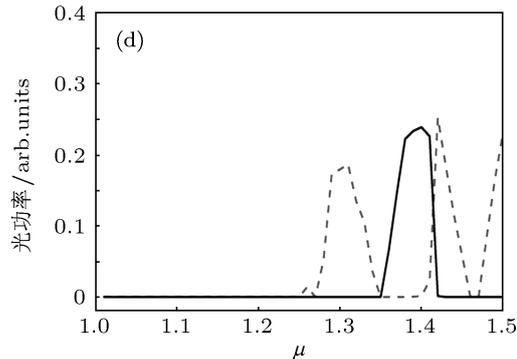
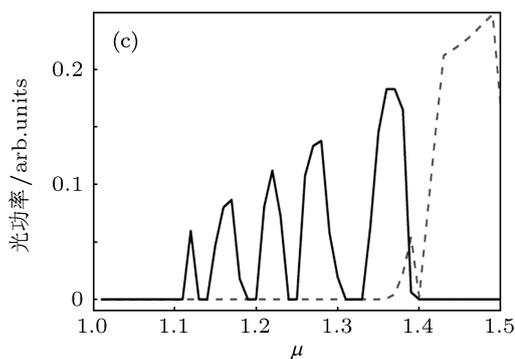
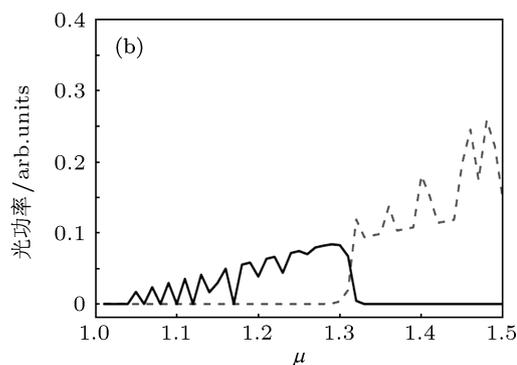
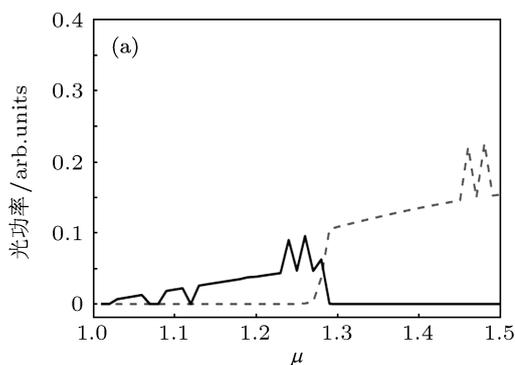


图9 $\eta = 1.2 \times 10^{-6}$, τ 分别为 (a) 1 ns, (b) 2 ns, (c) 4 ns, (d) 5 ns 时的 PS 特性 (实线代表 Y 偏振模, 虚线代表 X 偏振模)

图9为 $\eta = 1.2 \times 10^{-6}$ 不同 τ 时的 PS 特性. 从图9(a)中可以看出, 当 $\tau = 1$ ns 时, μ_{PS} 在 1.28 左右; 当 τ 增加时, 如图9(b)和(c), μ_{PS} 会有所增加; 当 τ 增加到 5 ns 时, PS 现象消失, 出现两偏振模竞争现象, 如图9(d)所示. 这与慢自旋反转率时的情景类似 (图5(d)), 增加 τ 会导致 VCSEL 运行的阈值提高. 与慢自旋反转率相比, 快自旋反转率时阈

值提高的幅度要大得多 (高达 1.25 倍).

5 结论

基于扩展的 SFM 模型, 本文对光电负反馈下 VCSEL 的 PS 特性进行了理论研究. 研究结果表明: 当激光器运行在快慢两种不同的自旋反转率时, 反

馈强度和延迟时间对 PS 特性产生较大影响. 在慢自旋反转率下运行时, 随着反馈强度的增加, μ_{PS} 呈线性增加, 从而导致 Y 偏振模运行电流范围扩大, 而 X 偏振模运行电流范围缩小, 这种规律和各向同性光反馈的情景恰好相反, 产生这一现象的原因是由于光电负反馈提高了 X 偏振模的阈值; 延迟时间对 PS 特性的影响因反馈强度而异, 当反馈强度较小时, 随着延迟时间的增加, μ_{PS} 变化较小, 当反馈强度较大时, μ_{PS} 随着延迟时间的增加而逐渐减小, 在延迟时间小于 2.5 ns 的区域内, μ_{PS} 运行在较高

的值, 此时 X 偏振模获得了较大的压缩. 在快自旋反转率下运行时, 反馈强度对 μ_{PS} 的影响与慢自旋反转率时的情形不同, μ_{PS} 值经历先增加后减小的过程, PS 特性受反馈强度的影响更加敏感; 延迟时间对 μ_{PS} 的影响规律和慢自旋反转率时相似. 此外, 还发现在两种自旋反转率下, 自发辐射噪声对 PS 特性的影响较大, 因此, 在实际应用中应过滤或衰减噪声强度. 本文的研究结果有望为光电负反馈下 VCSEL 混沌通信模块的实验研究提供理论指导.

- [1] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [2] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [3] Masoller C, Torre M S 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 483
- [4] Badilita V, Carlin J F, Ilegems M, Brunner M, Verschaffelt G, Panajotov K 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 365
- [5] Augustin L M, Smalbrugge E, Choquette K D, Karouta F, Strijbos R C, Verschaffelt G, Geluk E J, van de Roer T G, Thienpont H 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 708
- [6] Sondermann M, Weinkath M, Ackemann T 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 97
- [7] Paul J, Masoller C, Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1987
- [8] Danckaert J, Peeters M, Mirasso C, Miguel M S, Verschaffelt G, Albert J, Nagler B, Unold H, Michalzik R, Giacomelli G, Marin F 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 911
- [9] Choquette K D, Leibenguth R E 1994 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6** 40
- [10] Yoshikawa T, Kawakami T, Saito H, Kosaka H, Kajita M, Kurihara K, Sugimoto Y, Kasahara K 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1009
- [11] Meng P T, Ansas M K, Timothy A S, Kent D C 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 745
- [12] Russell T H, Milster T D 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 2520
- [13] Hong Y, Spencer P S, Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 2151
- [14] Valle A, Pesquera L, Shore K A 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 639
- [15] Besnard P, Chares M L, Stephan G, Robert F 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 1059
- [16] Sciamanna M, Panajotov K, Thienpont H, Veretennicoff I, Megret P, Blondel M 2003 *Opt. Lett.* **28** 1543
- [17] 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]
- [18] 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
- [19] Valle A, Sciamanna M, Panajotov K 2007 *Phys. Rev. E* **76** 046206
- [20] Hong Y H, Paul J, Spencer P S, Shore K A 2008 *IEEE J. Quantum Electron.* **44** 30
- [21] Wang X F, Xia G Q, Wu Z M 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 160
- [22] Zhong W L, Luo B, Li X F, Zuo X H, Wang M Y 2007 *Appl. Opt.* **46** 7262
- [23] Wang X F, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4669 (in Chinese) [王小发, 夏光琼, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 4669]
- [24] Cao T, Lin X D, Xia G Q, Chen X H, Wu Z M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114203 (in Chinese) [曹体, 林晓东, 夏光琼, 陈兴华, 吴正茂 2012 物理学报 **61** 114203]
- [25] Ignace G, Marc S, Alexandre L, Krassimir P 2007 *Opt. Lett.* **32** 1629
- [26] Chen X H, Lin X D, Wu Z M, Fan L, Cao T, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094209 (in Chinese) [陈兴华, 林晓东, 吴正茂, 樊丽, 曹体, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 094209]
- [27] 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]
- [28] 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]
- [29] Ping X, Wu Z M, Wu J G, Jiang L, Deng T, Tang X, Fan L, Xia G Q 2013 *Opt. Commun.* **286** 339
- [30] Xiao Y, Deng T, Wu Z M, Wu J G, Lin X D, Tang X, Zeng L B, Xia G Q 2012 *Opt. Commun.* **285** 1442

Polarization switching dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser subject to negative optoelectronic feedback*

Wang Xiao-Fa[†]

(School of Optoelectronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Received 16 November 2012; revised manuscript received 11 December 2012)

Abstract

Using the extended spin-flip model, we theoretically investigate the polarization switching dynamics of a vertical-cavity surface-emitting laser subject to negative optoelectronic feedback. The results show that when the laser operates at two different the spin-flip rates, the feedback intensity and delay time have great influence on polarization switching dynamics. At a slow spin-flip rate, with the increase of feedback intensity, switching current increases linearly, that the X polarization mode is compressed is contrary to the reported results based on isotropic optical feedback. The reason may be due to the fact that the negative optoelectronic feedback improves the X polarization mode threshold; the effect of delay time will vary with feedback intensity. At a fast spin-flip rate, the effect of feedback strength is different from at a slow spin-flip rate, the switching point current undergoes a process in which the current increases first and then decreases gradually, the switching point current is more sensitively dependent on the feedback strength; while effect of the delay time is similar to that at a slow spin-flip rate. In addition, we find that the spontaneous emission noise has a great influence on polarization switching dynamics.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting laser, polarization switching, the optoelectronic negative feedback, spontaneous emission noise

PACS: 42.55.Px, 42.81.Gs, 42.65.Pc

DOI: 10.7498/aps.62.104208

* Project supported by Chongqing University of Posts and Telecommunications Doctoral Fund, China (Grant No. A2012-24) and the Science Foundation for Young Scientists of Chongqing University of Posts and Telecommunications, China (Grant No. A2012-84).

[†] Corresponding author. E-mail: wangxf@cqupt.edu.cn