

时变电流注入下光电负反馈垂直腔表面发射激光器 的偏振双稳特性*

黄雪兵 夏光琼 吴正茂[†]

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2009 年 5 月 6 日收到; 2009 年 9 月 3 日收到修改稿)

基于光电负反馈垂直腔表面发射激光器 (VCSELs) 的理论模型, 数值研究了时变电流注入下反馈率大小和注入电流扫描周期对 VCSELs 偏振双稳特性的影响. 研究表明: 增大反馈率将使双稳区域向更大电流方向移动, 同时双稳区宽度增加; 增大注入电流扫描周期将使双稳区宽度减小. 因此, 通过调整光电负反馈的大小以及注入电流的扫描周期, 可实现对 VCSELs 偏振双稳特性的控制.

关键词: 垂直腔表面发射激光器 (VCSELs), 偏振双稳, 光电负反馈, 时变电流

PACC: 0545, 4255P, 4265

1. 引 言

垂直腔表面发射激光器 (VCSELs) 作为一种新型的半导体激光器, 近年来受到相关领域国内外学者的广泛关注^[1-21]. 它具有低阈值电流、单纵模输出、圆形输出光斑以及易于做成大面积阵列等突出优点, 在光通信、光互连、光储存领域具有广泛的应用价值.

与传统的边发射半导体激光器不同, VCSELs 具有不稳定的偏振模式输出. 1995 年, Miguel 等人提出了著名的自旋反转模型 (SFM), 较好地解释了 VCSELs 的偏振模式特性^[1]. Martin-Regalado 进一步发展了这一理论^[2]. 由于 VCSELs 的偏振模式具有不稳定性, 对一具有单一偏振模式的 VCSEL, 通过改变激光器某些参量可出现偏振模式的突然跳变而使被抑制模式转变为主导模式, 同时原主导模式被抑制, 这种现象被称为偏振开关 (PS)^[3]. 发生偏振开关的位置随着参量变换的路径而发生改变, 这一现象称为偏振双稳.

VCSELs 在光反馈和光注入下的偏振双稳现象已有一些理论和实验研究结果报道. 如 Hong 等人从理论和实验上研究了外光反馈对 VCSELs 的偏振

双稳特性的影响^[4]; Zhang 等人研究了 VCSELs 在时变光注入下的偏振双稳特性^[5]; 我们也曾对弱光反馈下电流调制 VCSELs 的偏振特性进行了相关理论研究^[21]. 同时, 我们注意到目前关于光电负反馈下 VCSELs 双稳特性的研究不多见. 而光电反馈具有可靠且灵活等优势, 是一种常见的引入微扰方式^[6, 7, 22, 23]. 基于此, 本文基于光电负反馈下 VCSELs 的理论模型, 着重研究反馈率大小以及时变注入电流的扫描周期对 VCSELs 的偏振双稳特性的影响.

2. 理论模型

描述光电负反馈下 VCSELs 的速率方程组为^[6, 7, 21]

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

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

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

* 国家自然科学基金 (批准号: 60978003) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

其中,下标 x, y 分别表示两个线性偏振模, E 表示光场的慢变振幅, N 为总的反转载流子密度, 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_e 代表总的载流子衰减率, α 代表线宽增强因子, γ_s 代表自旋反转速率, γ_a 代表二向色性系数, γ_p 代表有源介质线性双折射系数, η 代表激光器的反馈系数, τ 代表反馈延迟时间, μ 代表对阈值电流进行归一化后的注入电流, F 代表朗之万噪声源, $F_{x,y} = (\beta_{sp})^{1/2} \zeta_{x,y}$, 而 ζ_x, ζ_y 是具有零平均值和归一化的独立高斯白噪声项, $P (= |E_x|^2 + |E_y|^2)$ 为归一化的输出功率, P_0 是 VCSELs 自由运行时归一化的输出功率.

3. 结果与分析

利用四阶龙格-库塔法可对速率方程(1)–(3)进行数值求解. 数值模拟过程中所用到的参数为 $\alpha = 3, k = 300 \text{ ns}^{-1}, \gamma_e = 1 \text{ ns}^{-1}, \gamma_s = 10 \text{ ns}^{-1}, \tau = 3 \text{ ns}, \beta_{sp} = 10^{-6} \text{ ns}^{-1}, \gamma_a = 1.6 \text{ ns}^{-1}, \gamma_p = 20\pi \text{ ns}^{-1}$. 前人的相关理论与实验研究已表明: VCSELs 随着注入电流的逐渐增加或逐渐减小会出现偏振开关现象, 偏振开关的位置与电流变化的路径有关, 即存在偏振双稳现象. 下面着重讨论 VCSELs 在时变注入电流下, 其偏振双稳特性随光电反馈系数以及注入电流的扫描快慢的变化规律. 在时变电流注入下, 归一化注入电流 μ 为时间的函数. 在仿真过程中假定 μ 随时间在 0.9–2.5 之间线性变化, 扫描时间为 T . μ 在奇数次时间时从 0.9 线性增大到 2.5 (正向扫描), 在偶数次时间时从 2.5 线性减小到 0.9 (反向扫描), 即

$$\mu = g_1 [t - (m-1)T] + 0.9 \quad (\text{正向扫描}), \quad (4a)$$

$$\mu = g_2 [t - (m-1)T] + 2.5 \quad (\text{反向扫描}), \quad (4b)$$

其中 m 为扫描次数, 斜率 $g_1 = (2.5 - 0.9)/T, g_2 = (0.9 - 2.5)/T$.

图 1 给出了两个连续扫描周期内(即正向扫描和反向扫描)注入电流随时间变化的曲线(a), VCSELs 的输出功率随时间的变化(b), 以及输出功率随时变注入电流的变化关系曲线(c). 图 1 是在无光电反馈时, 时变注入电流扫描周期为 100 ns 的条件下得到的. 如图 1(a) 所示, 时变注入电流在前 100 ns 内从 0.9 线性增大到 2.5, 在后 100 ns 内从 2.5 线性减小到 0.9. 在该时变电流的作用下, VCSELs 的输出功率随时间的瞬时变化如图 1(b) 所

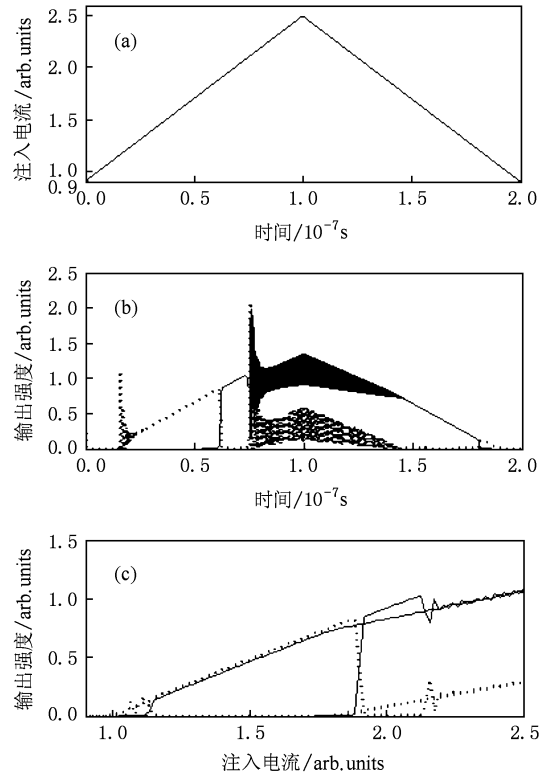


图 1 (a) 两个连续扫描周期内注入电流随时间变化的关系图线; (b) VCSELs 的输出功率随时间序列图的瞬时变化; (c) VCSELs 输出功率随注入电流的关系图线(图中实、虚线分别表示 x, y 模, $\eta = 0, T = 100 \text{ ns}$)

示. 从图中可以看出, 整个图形并不关于 $t = T$ 对称, 说明 VCSELs 输出功率不仅与归一化电流 μ 有关, 而且还与 μ 的变化趋势(正向扫描或反向扫描)密切相关, 即随着注入电流的变化存在偏振双稳现象, 如图 1(c) 所示. 需要说明的是: 考虑到实际探测仪器具有一定的响应时间, 因此图 1(c) 是对 1 ns 的时间窗口进行平均后得到的结果^[4]. 由图 1(c) 可以看出, 在正向扫描时, 注入电流达到 1.858 时出现 PS, 而反向扫描时, 注入电流在 1.135 时才出现 PS, 因此正反向扫描对应的 PS 所对应的电流值不相同, 其差值定义为双稳区宽度.

VCSELs 在外光电反馈作用下, 其动态特性将发生明显变化, 其偏振双稳特性也将受到影响. 图 2 给出反馈系数取不同值时, VCSELs 的输出功率随注入电流变化产生的双稳现象. 图 2(a), (b), (c) 中反馈率分别对应 $\eta = 0, 0.02$ 和 0.05 , 扫描周期都取 100 ns. 从图中可以看出: 当 $\eta = 0$, 双稳区出现在 $\mu = 1.135$ – 1.858 (图 2(a)); 当 $\eta = 0.02$, 双稳区出现在 $\mu = 1.138$ – 1.902 (图 2(b)); 而当 $\eta = 0.05$, 双

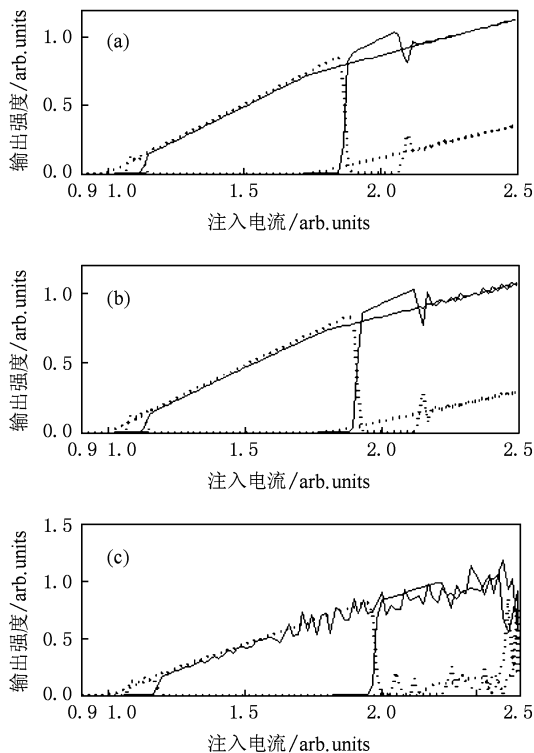


图2 不同反馈率时 VCSELs 的输出随注入电流的变化出现的双稳现象图(图中实、虚线分别表示 x, y 模, 扫描周期均为 100 ns) (a), (b), (c) 分别对应 $\eta=0, 0.02$ 和 0.05

稳区出现 $\mu = 1.162-1.967$ (图 2(c)). 因此, 随着反馈率的增大, 双稳区域的起始点和终止点都将向更大电流移动, 产生这一现象的原因是因为光电负反馈相当于降低了实际的注入电流大小, 从而增加了产生 PS 所需的注入电流.

从图 2 中还可以看出, 随着反馈率的增大, 双稳区宽度也有所改变. 图 3 给出了扫描周期取不同值时, VCSELs 双稳区宽度随反馈率大小的变化. 从图中可以看出, 随着反馈率的增大, VCSELs 的双稳区宽度总体呈现逐渐增大的趋势, 在反馈率相对较大的区域则呈现波动. 这是由于该区域内的反馈率使 VCSELs 呈现复杂的非线性动力学行为, 双稳区的边缘为混沌态, 从而导致双稳区宽度的变化出现无规则地涨落. 在反馈率相对较小的区域, VCSELs 输出双稳区宽度随反馈率增大呈现近似线性增加的趋势, 且扫描周期 T 越大, 增长的速度越慢. 过大的扫描周期将使 VCSELs 输出双稳区宽度对反馈率的

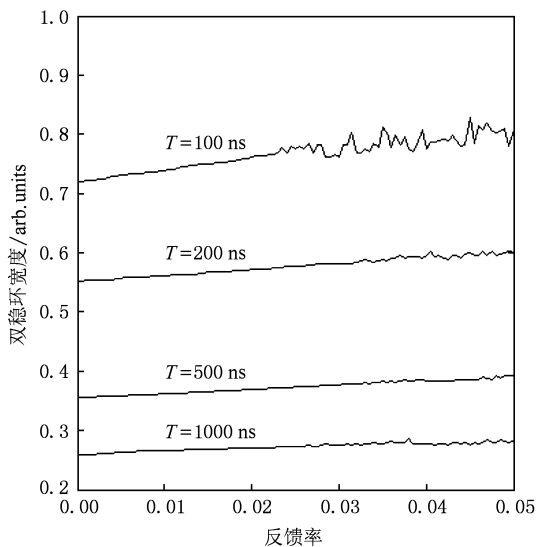


图3 扫描周期 T 取不同值时 VCSELs 双稳区宽度随反馈率的变化

变化不敏感. 因此, 为了更有效地控制双稳区, 应选取较小的光电反馈率, 同时时变注入电流具有较高的扫描速率. 另外, 随着扫描周期的增大, 双稳区宽度呈现较为明显的减小. 这是因为时变电流注入下 VCSELs 具有记忆效应, 而且注入电流变化得越快, 记忆效应越强, 双稳区越大.

4. 结 论

本文基于光电负反馈下 VCSELs 的速率方程, 从理论上分析了时变电流注入时反馈率和注入电流扫描周期对 VCSELs 偏振双稳特性的影响. 研究表明: VCSELs 在时变电流的注入下, 光电负反馈的引入将使偏振双稳的特性, 如双稳区宽度、开关电流位置等发生变化. 光电负反馈会使双稳区往更大电流方向移动, 且双稳区扩大. 随着反馈率的增大, 双稳区宽度总体呈现增加的趋势; 同时, 通过改变时变注入电流的扫描周期 T , 可得到不同宽度的双稳区. 因此, 通过调控光电负反馈强度和时变注入电流的扫描周期, 可控制 VCSELs 输出偏振双稳区大小及偏振开关位置. 我们希望本文的研究能有助于 VCSELs 在光开关和光逻辑运算等领域的应用.

- [1] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [2] Regalado J M, Balle S, Miguel M S, Valle A, Pesquera L 1997 *Quantum Semiclass. Opt.* **9** 713
- [3] Masoller C, Torre M S 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 483
- [4] Hong Y H, Ju R, Spencer P S, Shore K A 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 619
- [5] Zhang W L, Pan W, Luo B, Wang M Y, Zou X H 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 89
- [6] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y 2007 *App. Opt.* **46** 7262
- [7] Paul J, Masoller C, Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1987
- [8] Sciamanna M, Panajotov K, Thienpont H, Veretennicoff I, Megret P, Blondel M 2003 *Opt. Lett.* **28** 1543
- [9] Li X F, Pan W, Luo B, Deng G, Zhao Z 2004 *Chinese J. Lasers* **31** 1450 (in Chinese) [李孝峰、潘炜、罗斌、邓果、赵峥 2004 中国激光 **31** 1450]
- [10] Masoller C, Torre M S, Mandel P 2006 *J. App. Phys.* **99** 026108
- [11] Ohtsubo J 2007 *Semiconductor Lasers* (2nd ed) (Berlin: Springer) p232
- [12] Masoller C, Torre M S, Shore K A 2007 *IEEE J. Quantum Electron.* **43** 1074
- [13] Liu S F, Xia G Q, Wu J G, Li L F, Wu Z M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1502 (in Chinese) [刘胜芳、夏光琼、吴加贵、李林福、吴正茂 2008 物理学报 **57** 1502]
- [14] Zhong D Z, Xia G Q, Wang F, Wu Z M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3280 (in Chinese) [钟东洲、夏光琼、王飞、吴正茂 2007 物理学报 **56** 3280]
- [15] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *J. Quantum Electron.* **33** 765
- [16] Gatare I, Sciamanna M, Locquet A, Panajotov K 2007 *Opt. Lett.* **32** 1629
- [17] Ryvkin B, Panajotov K, Georgievsk A, Danckaert J, Peeters M, Verschaffelt G, Thienpont H, Veretennicoff I 1999 *J. Opt. Soc. Am. B* **16** 2106
- [18] Altes J B, Gatare I, Panajotov K, Thienpont H, Sciamanna M 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 198
- [19] Hong Y H, Paul J, Spencer P S, Shore K A 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 3210
- [20] Houlihan J, Goulding D, Busch T, Masoller C, Huyet G 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 050601
- [21] Wang X F, Xia G Q, Wu Z M 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 160
- [22] Xia G Q, Wu Z M, Liao J F 2009 *Opt. Commun.* **282** 1009
- [23] Deng T, Xia G Q, Cao L P, Chen J G, Lin X D, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 2243

Polarization bistability characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers with negative optoelectronic feedback subject to time-varying current*

Huang Xue-Bing Xia Guang-Qiong Wu Zheng-Mao[†]

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

(Received 6 May 2009; revised manuscript received 3 September 2009)

Abstract

Based on the theoretical model of vertical-cavity surface emitting lasers (VCSELs) with negative optoelectronic feedback, the influences of the feedback strength and the scan period of injection time-varying current on the polarization bistability characteristics of VCSELs have been investigated numerically. The results show that, with the increase of the feedback index, the bistability region moves towards bigger current side and the width of bistability region increases; while with the increase of the scan period of injection time-varying current, the width of bistability region decreases. As a result, the polarization bistability characteristics can be controlled through adjusting the strength of optoelectronic feedback and the scan period of time-varying injection current.

Keywords: vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs), polarization bistability, negative optoelectronic feedback, time-varying current

PACC: 0545, 4255P, 4265

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60978003).

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