

光反馈诱发长波长垂直腔面发射激光器低功耗偏振开关

王小发 吴正茂 夏光琼

Polarization switching with low power consumption induced by optical feedback in long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers

Wang Xiao-Fa Wu Zheng-Mao Xia Guang-Qiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 024204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.024204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于平行偏振光注入 1550nm 波段垂直腔表面发射激光器获取窄线宽光子微波的理论和实验研究

Theoretical and experimental investigation on the narrow-linewidth photonic microwave generation based on parallel polarized optically injected 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报.2016, 65(1): 014207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014207>

锥形太赫兹量子级联激光器输出功率与光束特性研究

Analyses of the output power and beam quality of the tapered terahertz quantum cascade lasers

物理学报.2015, 64(22): 224212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224212>

主副垂直腔面发射激光器动力学系统混沌输出的时延特征及带宽分析

Analyses of the time-delay signature and bandwidth of the chaotic output from a master-slave vertical-cavity surface-emitting laser dynamical system

物理学报.2015, 64(22): 224213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224213>

基于椭圆偏振光注入垂直腔表面发射激光器的正交偏振模式单周期振荡产生两路光子微波

Two channel photonic microwave generation based on period-one oscillations of two orthogonally polarized modes in a vertical-cavity surface-emitting laser subjected to an elliptically polarized optical injection

物理学报.2015, 64(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204203>

硅基 III-V 族量子点激光器的发展现状和前景

Quantum dot lasers on silicon substrate for silicon photonic integration and their prospect

物理学报.2015, 64(20): 204209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204209>

光反馈诱发长波长垂直腔面发射激光器 低功耗偏振开关*

王小发¹⁾²⁾³⁾ 吴正茂^{1)3)†} 夏光琼¹⁾

1) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2) (重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

3) (西南大学数学与统计学院, 重庆 400715)

(2015年8月28日收到; 2015年9月28日收到修改稿)

基于扩展的自旋反转模型, 对光反馈诱发下长波长垂直腔面发射激光器中的低功耗偏振开关进行了理论研究. 研究表明: 长波长垂直腔面发射激光器在自由运行下未能获得的偏振开关现象, 可以通过引入中等强度的偏振旋转光反馈来实现. 对比强弱两种不同的线性色散效应, 发现了一些有趣的现象: 弱线性色散条件下更易于在低注入电流下获得偏振开关, 并且产生偏振开关所需的反馈强度具有更大的调控范围; 强色散效应中未能始终获得偏振开关, 会出现两模共存区, 并且偏振开关出现的注入电流值较高. 同时, 观察到的偏振模跳变和多偏振开关现象类似于短波长垂直腔面发射激光器, 因而证实这两类激光器在偏振开关的本质规律上是相似的. 此外, 还对长波长垂直腔面发射激光器不易在低注入电流下获得偏振开关的原因进行了分析, 并给出了合理的解释.

关键词: 长波长垂直腔面发射激光器, 偏振旋转光反馈, 偏振开关

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

DOI: 10.7498/aps.65.024204

1 引言

垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting Laser, VCSEL)^[1–27] 是一种垂直表面发光的新颖半导体激光器, 因其具有的独特优势, 有望在众多应用领域取代常规的边发射半导体激光器 (edge-emitting laser, EEL). VCSEL 被发明 30 年来^[4], 对激光波长小于 1.3 μm -VCSEL 的研究不管是在理论^[5,6] 还是实验方面^[7–9] 都取得了重要进展. 近年来, 长波长 1550 nm 波段的 VCSEL 在制造技术方面取得了突破性进展^[10], 该器件的相关特性在相关领域引起广泛关注.

偏振开关 (polarization switching, PS)^[11–15] 是 VCSEL 呈现的重要特性, 在光开关、光信息处

理、光互联等领域应用广泛. 产生 PS 现象的原因目前还不清楚, 存在的主流解释有两种^[16]: 一种是把两线偏振模之间的增益变化归因于光子能量和有源区温度 (the active region temperature, TART) 的变化, 这种 PS 称之为 I 型 PS; 另一种是基于自旋反转模型 (spin-flip model, SFM)^[5,6] 把 PS 归结为 VCSEL 有源区的饱和色散 (与线宽增强因子有关) 和自旋弛豫过程共同作用的结果, 这种 PS 称之为 II 型 PS. 概括起来, PS 在本质上受 VCSEL 中线宽增强因子、有源区材料的双折射效应以及饱和色散效应的影响^[17]. 在自由运行短波长 VCSEL 中, 通过改变注入电流 (或 TART) 就能产生 PS 现象. 然而在自由运行的 1550 nm-VCSEL 中, 由于激光器本身的线性双折射效应 (γ_p) 往往与短波长相比有较大区别, 因而会呈现不一样的 PS 特性. 当 γ_p

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178011, 61275116, 11304409, 61475127, 61575163) 和重庆市自然科学基金 (批准号: CSTC2013cyjA40004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

取值较小时, 易于获得PS现象, 这传统短波长VCSEL类似^[18,19]. 但当 γ_p 取值远大于短波长VCSEL的取值时, 虽然有实验观察到能在自由运行时较高注入电流(14.1 mA)下能获得PS现象^[20], 但这种PS特性因为能耗大不利于光子集成而导致其在光信息处理领域的应用价值不大, 而实际上大部分实验甚至在8倍阈值电流以上都未曾观察到PS现象^[21,22].

最近, 利用偏振旋转光反馈(polarization-rotated optical feedback, PROF)技术, 在短外腔1550 nm-VCSEL中获得了各种动力学特性^[23], 其中即使 γ_p 取值较大时, 也能观察到丰富的PS现象. 基于此, 本文进一步利用PROF在实际中易于实现的优点, 研究在较低的注入电流下诱发1550 nm-VCSEL实现PS, 希望能拓展1550 nm-VCSEL在低功耗全光缓存器领域的应用.

2 系统模型

图1为分析PROF下1550 nm-VCSEL的PS特性的系统构架示意图. 1550 nm-VCSEL发出的光经过四分之一波片($\lambda/4$)后, 经部分反射镜(VRM)被分为两部分. 一部分反射光经过四分之一波片($\lambda/4$)实现偏振反转后, 反射回1550 nm-VCSEL内部; 另一部分透射光经过另一四分之一波片($\lambda/4$)后, 两线偏振光振动方向也发生 90° 旋转. 此后的输出光再经过分束器(BS)分成两束: 一束光进入功率计(PM)进行功率探测, 另一束经二分之一波片($\lambda/2$)后使两线偏振光振动方向再旋转 90° , 回到最初的偏振状态. 该光最后经偏振分束器

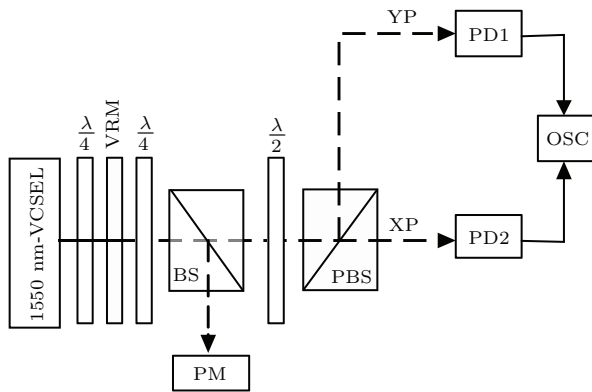


图1 分析PROF下1550 nm-VCSEL的PS特性的系统构架图

Fig. 1. Schematic diagram used to analyze the polarization switching characteristics in 1550 nm-VCSEL subject to polarization-rotated optical feedback.

(PBS)后, 分开成X和Y方向的两束线偏振光, 两束光分别经光电探测器PD1和PD2后, 进入示波器(OSC)进行PS特性分析. 图中虚线代表光路, 实线代表电路.

3 理论

根据SFM模型的相关理论^[5,6], 描述PROF下1550 nm-VCSEL的速率方程可表示为^[24,25]

$$\begin{aligned} \frac{dE_x}{dt} = & k(1 + i\alpha)[(N - 1)E_x + inE_y] \\ & - (\gamma_a + i\gamma_p)E_x \\ & + \eta E_y(t - \tau) \exp(-i\omega\tau), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_y}{dt} = & k(1 + i\alpha)[(N - 1)E_y - inE_x] \\ & + (\gamma_a + i\gamma_p)E_y \\ & + \eta E_x(t - \tau) \exp(-i\omega\tau), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} = & \gamma_N[\mu - N(1 + P) \\ & - in(E_y E_x^* - E_x E_y^*)], \end{aligned} \quad (3)$$

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

其中, t 为时间, 下标 x, y 分别表示X, Y线偏振模, E 为慢变振幅, N 为能级上的总载流子密度, n 为两自旋反转载流子密度的差值, τ 为反馈光的延迟时间, ω 为1550 nm-VCSEL自由运行时的角频率, η 为反馈系数, k 为光场的衰减速率, α 为线宽增强因子, γ_s 为自旋反转速率, γ_N 为总载流子的衰减速率, γ_a 代表线性色散效应, γ_p 代表有源介质的线性双折射效应, μ 为归一注入电流^[5,6], $P = |E_x|^2 + |E_y|^2$ 为归一化功率. 因PROF的扰动效果远大于噪声的影响, 因而下面的分析忽略了噪声作用.

4 结果与讨论

四阶Runge-Kutta数值方法非常适合求解激光器的速率方程, 因此本文利用该方法对(1)–(4)式进行求解, 所用参数取值如下^[22]: $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 2.2$, $k = 125 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_N = 0.67 \text{ ns}^{-1}$, $\tau = 3 \text{ ns}$, $\gamma_p = 192 \text{ ns}^{-1}$, $\omega = 1.22 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ (对应波长为1543 nm), 计算时间步长取为1 ps, 文献^[22]中证实上述参数与实验结果符合较好, 并且

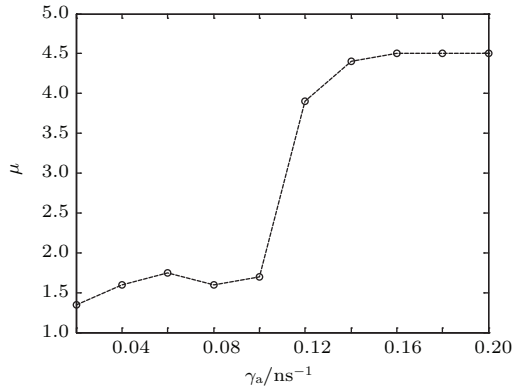
图2 γ_a 与 PS 点电流的关系曲线

Fig. 2. The relationship curve between γ_a and PS point current.

证实在这些参数下 1550 nm-VCSEL 自由运行在 8 倍阈值电流以下均不能实现 PS. 此外, 由于线性色散参数 γ_a 的取值反映了两线偏振模初始增益的差值 [6], 因此该参数值的大小和产生 PS 点的注入电流位置直接相关, 也间接决定了在 1550 nm-VCSEL 中诱发 PS 现象所需反馈强度的大小. 基

于此, 首先对不同线性色散效应下的 PS 效应进行分析. 图 2 为 γ_a 与 PS 点电流的关系曲线. 从图中可以看出, 通过调节合适的反馈强度, 在 $\gamma_a < 0.1 \text{ ns}^{-1}$ 的范围内, 能实现 2 倍阈值电流以下的 PS, 最低 PS 电流能达到 1.35 倍阈值. 而在 $\gamma_a \geq 0.1 \text{ ns}^{-1}$ 的范围内, PS 点电流较大, 超过 4 倍阈值. 此外, 对于 $\gamma_a > 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 的范围, 发现 PS 基本消失, 光反馈只能诱发两模共存现象. 根据图 2 的特点, 以下分两种情况对不同 γ_a 值下的 PS 特性进行分析.

4.1 弱线性色散效应下的 PS 现象

弱线性色散效应的取值范围定义为 $\gamma_a < 0.1 \text{ ns}^{-1}$, 这里取 $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$ 进行讨论, 与文献 [22] 所用参数一致.

4.1.1 $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$ 时, 中等反馈诱发的 PS 现象

图 3 为 $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同反馈强度下的

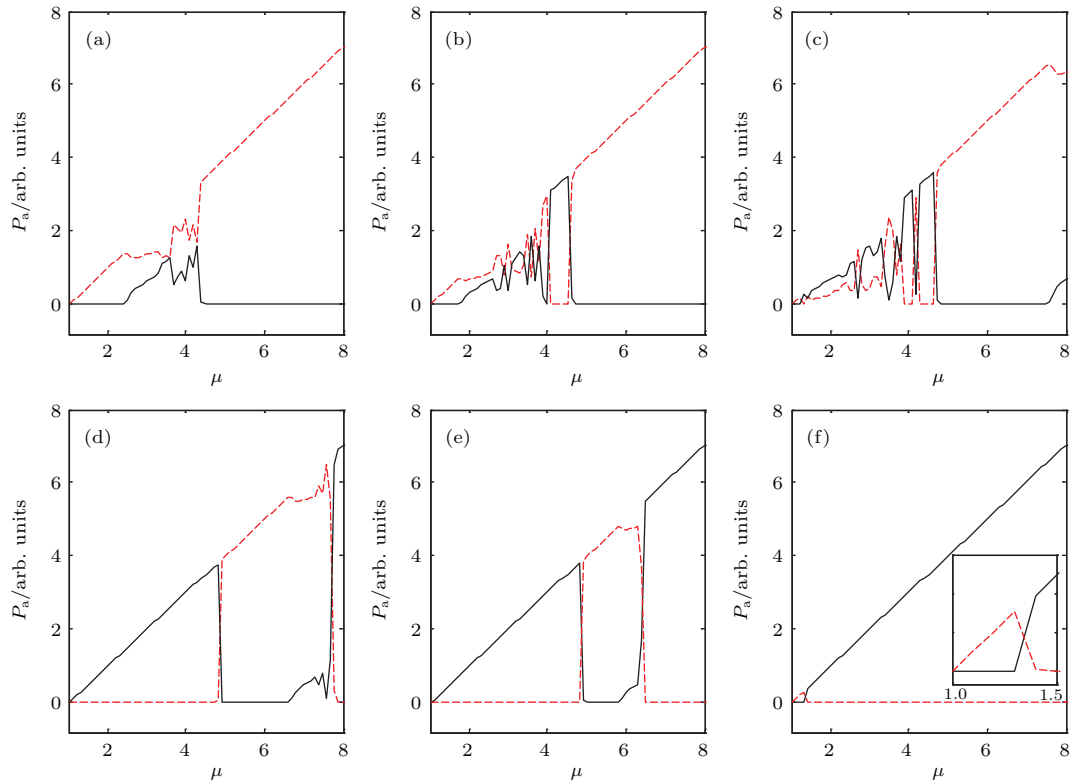


图3 (网刊彩色) $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同反馈强度下的 PS 特性曲线 (a) $\eta = 9 \text{ ns}^{-1}$; (b) $\eta = 10 \text{ ns}^{-1}$; (c) $\eta = 11 \text{ ns}^{-1}$; (d) $\eta = 12 \text{ ns}^{-1}$; (e) $\eta = 13 \text{ ns}^{-1}$; (f) $\eta = 15 \text{ ns}^{-1}$ ((f) 中的插图为 PS 点处位置放大图. 黑色实线代表 XP 模, 红色虚线为 YP 模)

Fig. 3. (color online) PS characteristic curves under different feedback strength at $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$: (a) $\eta = 9 \text{ ns}^{-1}$; (b) $\eta = 10 \text{ ns}^{-1}$; (c) $\eta = 11 \text{ ns}^{-1}$; (d) $\eta = 12 \text{ ns}^{-1}$; (e) $\eta = 13 \text{ ns}^{-1}$; (f) $\eta = 15 \text{ ns}^{-1}$, the insert map in Fig. 3 (f) is an enlarged picture around the PS point position. Black solid lines and red dashed lines represent the XP and YP modes, respectively.

PS特性曲线. 图中纵坐标 P_a 为平均输出功率, 对10 ns时间范围内的输出功率取平均. 从图3(a)—(c)中可以看出, 随着反馈强度的增加, 两线偏振模的竞争不断加剧, 出现了偏振模跳变现象. 继续增加反馈强度, 如图3(d)和(e)所示, 偏振模会发生反转, 最初占主导的YP模会转变为XP模, 这一现象据我们所知是首次被理论预计, 尚有待实验验证, 同时还出现了多PS现象. 在图3(f)中, 当反馈强度增加到 14.5 ns^{-1} 后, 激光输出呈现单PS现象, 并且开关点出现在较低的注入电流(1.35倍阈值电流)处, 开关点细节如图3(f)中的插图所示. 并且反馈强度在 14.5 ns^{-1} — 17.5 ns^{-1} 范围内PS点能保持基本恒定.

4.1.2 $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$ 时, 反馈强度对开关点电流位置的影响

图4为 $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$ 时, 反馈强度与PS点电流的变化曲线. 从图中可以看出, 中等反馈强度下就能在8倍阈值电流内始终获得PS现象. 在注入电流小于4.5倍阈值电流的范围内, 获得PS现象所需的反馈强度较小, 且反馈强度始终维持在 10 ns^{-1} 左右. 注入电流在4.5—5倍阈值电流之间

获得PS现象所需的反馈强度会发生一次跃变, 由 10 ns^{-1} 迅速增加到 14 ns^{-1} , 最后呈线性减小趋势.

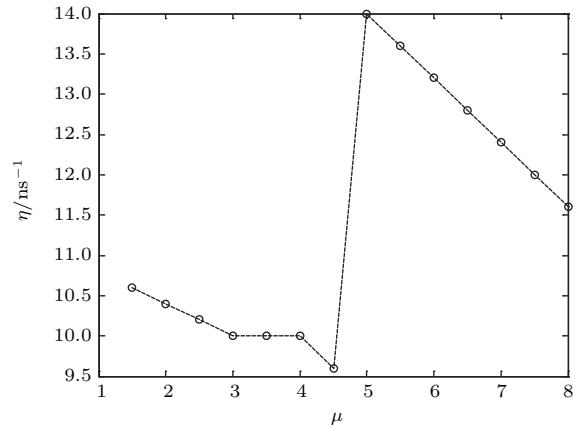


图4 $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$ 时, 反馈强度与PS点电流的变化曲线
Fig. 4. The relationship curve between feedback strength and PS current at $\gamma_a = 0.02 \text{ ns}^{-1}$.

图5为不同注入电流下PS点位置随反馈强度的变化曲线. 从图中可以看出, 反馈强度的变化不会改变激光器输出功率的平均值. 在注入电流略高于阈值电流时($\mu = 1.5$), 如图5(a)所示, 最初PS出现的反馈强度为 10.6 ns^{-1} 位置, 整个范围内偏

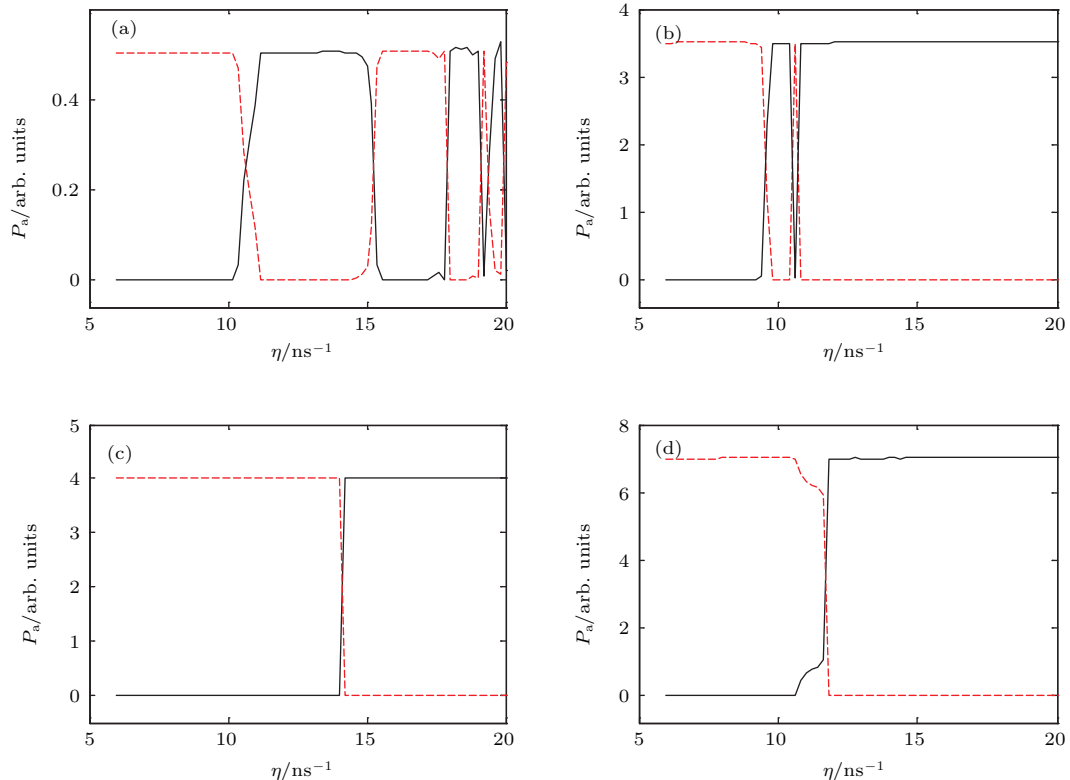


图5 (网刊彩色) 不同注入电流下PS点位置随反馈强度的变化曲线 (a) $\mu = 1.5$; (b) $\mu = 4.5$; (c) $\mu = 5$; (d) $\mu = 8$ (黑色实线代表XP模, 红色虚线为YP模)

Fig. 5. (color online) The relationship curves between the feedback strength and the PS point position: (a) $\mu = 1.5$; (b) $\mu = 4.5$; (c) $\mu = 5$; (d) $\mu = 8$ (Black solid lines and red dashed lines represent XP and YP modes, respectively).

振模竞争激烈, 会出现多PS现象. 在图5(b)中, 偏振模竞争效应减弱, 发生PS的反馈强度略微减小. 继续增加注入电流, 整个反馈强度范围内只有一个PS发生, 如图5(c)和(d)所示.

4.2 强线性色散效应下的PS现象

强线性色散效应的范围定义为 $\gamma_a \geq 0.1 \text{ ns}^{-1}$, 这里取 $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 作为研究对象, 与通常短波长VCSEL的取值一致, 更高的 γ_a 值会导致PS点电流出现的位置大大增加, 激光输出会呈现复杂的动力学状态.

4.2.1 $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 时, 中等反馈诱发的PS现象

图6为 $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同反馈强度下的PS特性曲线. 从图6(a)中可以看出, 在反馈强度

为 18 ns^{-1} 时, 能诱发XP模在4倍阈值电流处发生触发, 由于信号较弱, 未能形成PS. 继续增大反馈强度, 如图6(b)所示, 会出现短波长VCSEL中常见的偏振模跳变现象^[26,27], 这一现象在长外腔1550 nm-VCSEL中还是首次被理论预计, 跳变发生的注入电流范围为5.7—7.7倍阈值电流之间. 继续增加反馈强度到 $\eta = 20 \text{ ns}^{-1}$, 在考察的注入电流范围内, 双PS现象被观察到, 其中最低PS点电流为4.5倍阈值电流, 如图6(c)所示. 在图6(d)—(f)中, 双PS和多PS现象能够被观察到, 在PS点电流以下区域, 输出功率随反馈强度的增加波动加剧. 与弱线性色散效应时的情况相比, 强线性色散效应时PS点出现的位置是弱线性色散效应时的3倍左右, 并且PS稳定存在的反馈强度可调范围要小得多.

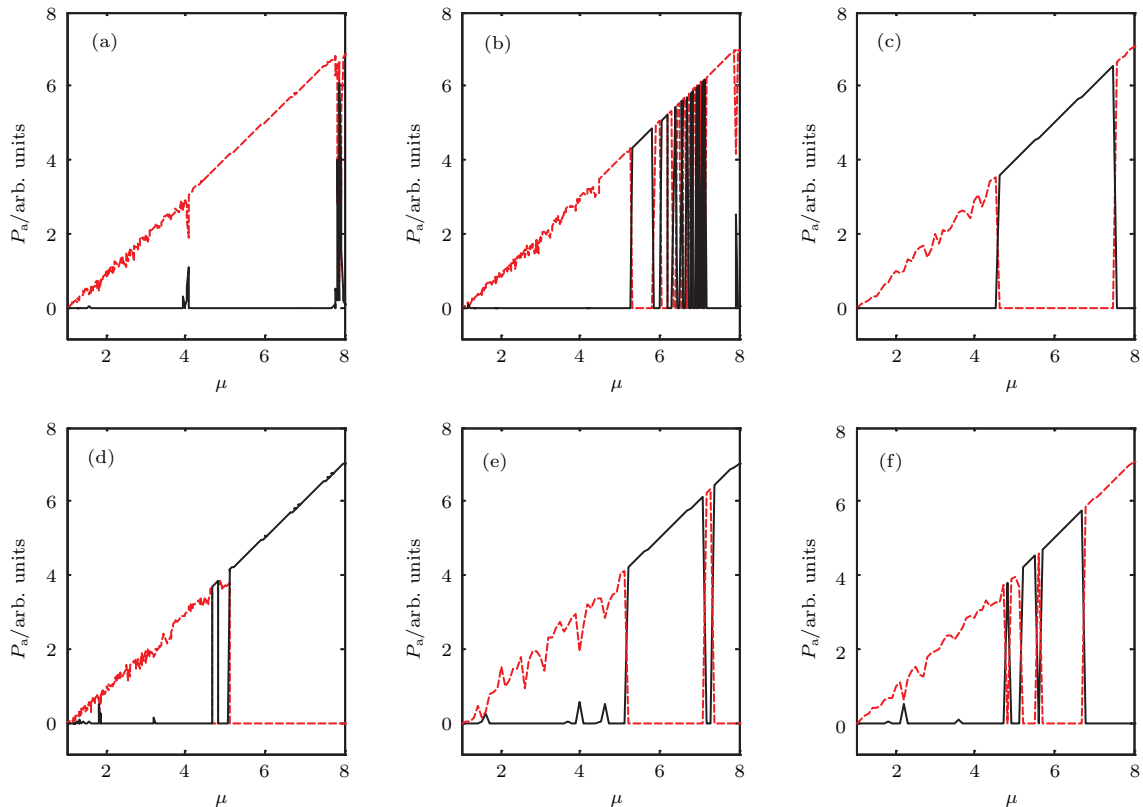


图6 (网刊彩色) $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同反馈强度下的PS特性曲线 (a) $\eta = 18 \text{ ns}^{-1}$; (b) $\eta = 19 \text{ ns}^{-1}$; (c) $\eta = 20 \text{ ns}^{-1}$; (d) $\eta = 21 \text{ ns}^{-1}$; (e) $\eta = 22 \text{ ns}^{-1}$; (f) $\eta = 23 \text{ ns}^{-1}$ (黑色实线代表XP模, 红色虚线为YP模)

Fig. 6. (color online) PS characteristic curves under different feedback strength at $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$: (a) $\eta = 18 \text{ ns}^{-1}$; (b) $\eta = 19 \text{ ns}^{-1}$; (c) $\eta = 20 \text{ ns}^{-1}$; (d) $\eta = 21 \text{ ns}^{-1}$; (e) $\eta = 22 \text{ ns}^{-1}$; (f) $\eta = 23 \text{ ns}^{-1}$ (Black solid lines and red dashed lines represent XP and YP modes, respectively).

4.2.2 $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 时, 反馈强度对开关点电流位置的影响

图7为 $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同反馈强度和注入电流下的输出偏振特性曲线. 从图中可以看出, 在

小于4.5倍阈值电流的范围内(实心圆点所示), 激光输出功率呈两模共存的状态, 不能形成PS, 这一现象在弱线性色散效应中未曾发现. 同时, 获得两模共存的反馈强度呈现先增加后逐渐减小的规律,

在注入电流为2.5倍阈值电流时, 获得两模共存所需的反馈强度最大. 在注入电流大于4.5倍阈值电流的范围内(倒三角所示), 能始终出现PS现象, 并且产生PS所需的反馈强度在 19 ns^{-1} — 20 ns^{-1} 之间波动.

图8为 $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同注入电流下激光器的输出偏振特性. 图8(a)和(b)为两模共存的情景, 从图中可以看出, 注入电流为2.5倍阈值电流时出现两模共存所需的反馈强度为 25.7 ns^{-1} , 而在4.5倍阈值电流处, 两偏振模共存的特征明显减弱. 在5倍阈值电流处, 如图8(c)所示, PS现象出现在反馈强度为 20 ns^{-1} 位置附近, 此时PS持续范围较窄. 在图8(d)中, 现象较为特殊, 在反馈强度为 18 ns^{-1} 附近, XP模中形成一个脉冲式的触发信号, 但该信号扰动不足以引发PS, 继续增加反馈强度到 21 ns^{-1} 左右, PS现象出现. 继续增加反馈强度, 会有多PS出现, 这一过程清晰地反映了两线偏

振模之间的竞争过程.

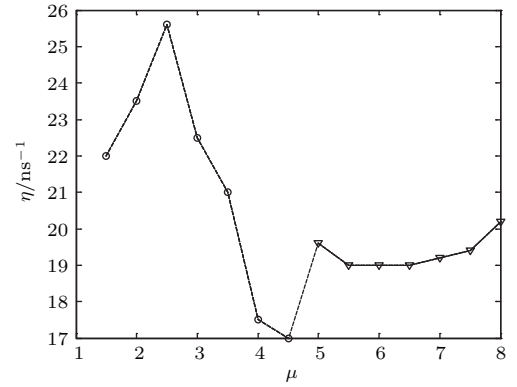


图7 $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同反馈强度和注入电流下的偏振输出特性曲线 (其中空心圆点对应的曲线范围为两模共存区, 倒三角对应的曲线范围为PS区)

Fig. 7. Polarization properties under different feedback strength and injection current at $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$, where the hollow dots and inverted triangles correspond to two mode coexistence region and PS area, respectively.

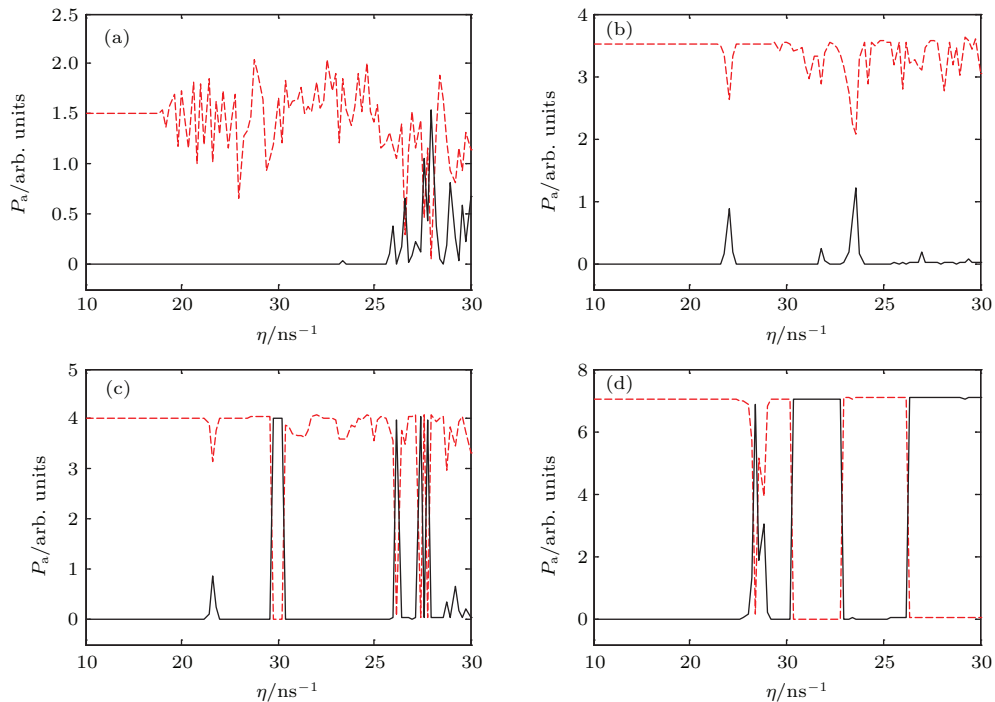


图8 (网刊彩色) $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$ 时, 不同注入电流下激光器的输出偏振特性 (a) $\mu = 2.5$; (b) $\mu = 4.5$; (c) $\mu = 5$; (d) $\mu = 8$ (黑色实线代表XP模, 红色虚线为YP模)

Fig. 8. (color online) Polarization characteristics under different injection current at $\gamma_a = 0.2 \text{ ns}^{-1}$, where (a) $\mu = 2.5$; (b) $\mu = 4.5$; (c) $\mu = 5$; (d) $\mu = 8$ (Black solid lines and red dashed lines represent XP and YP modes, respectively).

5 结 论

基于扩展的SFM模型, 本文对光反馈诱发下长波长垂直腔面发射激光器中的低功耗PS进行了

理论研究. 研究结果表明: 对于1550 nm-VCSEL在自由运行下未能获得的PS现象, 可以通过引入中等强度的PROF诱发其在低注入电流(1.35倍阈值电流)下实现, 并且能够在较大反馈强度范围内

保持PS现象的稳定存在. 对比强弱两种不同的线性色散效应, 发现弱线性色散效应下更易于在低注入电流下获得PS现象, 并且产生的PS更加稳定. 观察到的偏振模跳变和多PS现象也非常类似于短波长VCSEL. 与短波长VCSEL对比发现, 由于1550 nm-VCSEL中的 γ_p 值远大于短波长, 两线偏振模之间的频差达到60 GHz (或0.48 nm) 以上, 这导致两线偏振模之间的关联效应减弱, 不易在低注入电流下获得PS现象, 合适的PROF能够弥补这种关联性的不足. 本文的工作还揭示了长短波长VCSEL在PS本质规律上是类似的, 都能在低注入电流下实现PS. 本文的研究结果可望为下一步利用1550 nm-VCSEL开展低功耗全光缓存器的技术研发提供理论指导.

参考文献

- [1] Cao T, Xu C, Xie Y Y, Kan Q, Wei S M, Mao M M, Chen H D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 024205
- [2] Wang X F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104208 (in Chinese) [王小发 2013 物理学报 **62** 104208]
- [3] Wang X F, Xia G Q, Wu Z M 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 160
- [4] Iga K 2000 *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.* **6** 1201
- [5] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [6] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [7] Regalado J M, Miguel M S, Abraham N B, Prati F 1996 *Opt. Lett.* **21** 351
- [8] Balle S, Tolkachova E, Miguel M S, Tredicce J R, Regalado J M, Gahl A 1999 *Opt. Lett.* **24** 1121
- [9] Koyama F 2006 *J. Light. Technol.* **24** 4502
- [10] Muller M, Hofmann W, Grundl T, Horn M, Wolf P, Nagel R D, Ronneberg E, Bohm G, Bimberg D, Amann M C 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1158
- [11] Masoller C, Abraham N B 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1078
- [12] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1276
- [13] Zhang W L, Pan W, Luo B, Wang M Y, Zou X H 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 889
- [14] Xiang S, Pan W, Yan L, Luo B, Zou X, Jiang N, Wen K 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 2512
- [15] Chen J J, Xia G Q, Wu Z M 2015 *Chin. Phys. B* **24** 024210
- [16] Kaplan A B 2007 *B. A. Thesis*. (Akron: Amherst College)
- [17] Hitoshi K 1997 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **3** 1254
- [18] Lee S H, Jung H W, Kim K H, Lee M H, Yoo B S, Roh J, Shore K A 2010 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **22** 1759
- [19] 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
- [20] Katayama T, Ooi T, Kawaguchi H 2009 *IEEE J. Quantum Electron.* **45** 1495
- [21] Torre M, Hurtado A, Quirce A, Valle A, Pesquera L, Adams M 2011 *IEEE J. Quantum Electron.* **47** 92
- [22] Al-Seyab R, Schires K, Khan N A, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 1242
- [23] Wang X F, Li J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014203 (in Chinese) [王小发, 李骏 2014 物理学报 **63** 014203]
- [24] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12620
- [25] Xiang S, Pan W, Yan L, Luo B, Zou X, Jiang N, Wen K 2011 *Opt. Lett.* **36** 310
- [26] Valle A, Pesquera L, Shore K A 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 639
- [27] Sciamanna M, Panajotov K, Thienpont H, Veretennicoff I, Mégret P, Blondel M 2003 *Opt. Lett.* **28** 1543

Polarization switching with low power consumption induced by optical feedback in long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers*

Wang Xiao-Fa¹⁾²⁾³⁾ Wu Zheng-Mao^{1)3)†} Xia Guang-Qiong¹⁾

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

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

3) (School of Mathematics and Statistics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 28 August 2015; revised manuscript received 28 September 2015)

Abstract

The polarization switching (PS) characteristics of vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) have received sustained attention for the past years. With the development of manufacturing technology, the performances of 1550 nm VCSELs have been improved, however the researches on the PS of 1550 nm VCSELs are relatively inadequate for the PS characteristics in the long-wavelength VCSELs may have wide application prospects in optical information processing and optical communications. In this paper, based on the extended spin-flip model (SFM), we theoretically investigate the PS with low power consumption induced by optical feedback in long-wavelength VCSELs. Results show that the PS, which is failed to realize in free-running long-wavelength VCSELs, can be achieved by introducing a moderate-strength polarization-rotation optical feedback. By comparing two different linear dispersion effects, some interesting phenomena have been found. For weak linear dispersion, the PS is relatively easy to realize for a low injection current level, and the range of feedback strength used to control the PS is wide. However, for strong dispersion effect, the PS cannot be obtained all the time since two mode-coexisting zones will appear, and the value of injection current where the PS happens is relatively high. Meanwhile, as observed in short-wavelength VCSELs, the polarization mode hopping and multiple PS have also been found in long-wavelength VCSELs, indicating that the physics nature that induces the PS is similar for both long and short wavelength VCSELs. In addition, because the PS in long-wavelength VCSEL is more difficult to realize as compared with that in short-wavelength VCSELs, reasonable analyses and explanations may be as follows: since the linear dispersion effect in 1550 nm-VCSEL is much stronger than that of short wavelength VCSEL, the frequency difference between the two linear polarization modes is up to 60 GHz (or 0.48 nm), thus leading to the decrease of the correlation between two linear polarization modes. As a result, it is relatively difficult to obtain the PS phenomenon at low injection current level in long-wavelength VCSEL; while using suitable polarization-rotated optical feedback can partially compensate the deficiency of this correlation. We believe that the results obtained in this work will be helpful in investigation of low power consumption for all optical buffers by using long-wavelength VCSELs.

Keywords: long-wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers, polarization-rotated optical feedback, polarization switching

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

DOI: 10.7498/aps.65.024204

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178011, 61275116, 11304409, 61475127, 61575163) and the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant No. CSTC2013cyjA40004).

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