

可变偏振光注入下 1550 nm 垂直腔面发射激光器的偏振开关及双稳特性

陈俊 陈建军 吴正茂 蒋波 夏光琼

Investigations on the polarization switching and bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under variable-polarization optical injection

Chen Jun Chen Jian-Jun Wu Zheng-Mao Jiang Bo Xia Guang-Qiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 164204 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.164204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率、高效率 808nm 半导体激光器阵列

High-power, high-efficiency 808 nm laser diode array

物理学报.2016, 65(16): 164203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164203>

894nm 高温垂直腔面发射激光器及其芯片级铯原子钟系统的应用

894 nm high temperature operating vertical-cavity surface-emitting laser and its application in Cs chip-scale atomic-clock system

物理学报.2016, 65(13): 134204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.134204>

1550nm 垂直腔面发射激光器自旋反转模型中关键参量数值的实验确定

Experimental determination of key parameters in the spin-flip model of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报.2016, 65(12): 124203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124203>

基于有机半导体激光材料的高灵敏度溶液检测传感器件

A highly sensitive chemosensor for solution based on organic semiconductor laser gain media

物理学报.2016, 65(6): 064202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064202>

光反馈诱发长波长垂直腔面发射激光器低功耗偏振开关

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

物理学报.2016, 65(2): 024204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024204>

# 可变偏振光注入下 1550 nm 垂直腔面发射激光器的偏振开关及双稳特性\*

陈俊<sup>1)</sup> 陈建军<sup>1)2)</sup> 吴正茂<sup>1)</sup> 蒋波<sup>1)</sup> 夏光琼<sup>1)†</sup>

1)(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2)(新疆医科大学医学工程技术学院, 乌鲁木齐 830011)

(2016年4月9日收到; 2016年6月14日收到修改稿)

基于自旋反转模型, 研究了可变偏振光注入 1550 nm 垂直腔面发射激光器 (VPOI-1550 nm-VCSEL) 的偏振开关 (PS) 及双稳 (PB) 特性. 研究表明: 对于一自由运行的 1550 nm-VCSEL, 在给定电流下, 激光器中的平行偏振模式 (Y 偏振模式) 激励, 而正交偏振模式 (X 偏振模式) 被抑制. 引入可变偏振光注入后, 在给定频率失谐  $\Delta\nu$  (定义为注入光与 X 偏振模式之间的频率差异) 的条件下, 当注入光偏振角  $\theta_p$  (定义为注入光的偏振方向与自由运行 1550 nm-VCSEL 中主导偏振模式的夹角) 足够大时, 正向扫描 (逐渐增加) 注入光功率可观察到 1550 nm-VCSEL 发生 I 类 PS, 反向扫描 (逐渐减小) 注入光功率可使 1550 nm-VCSEL 产生 II 类 PS, 且两类 PS 的开关点要求的注入功率不一致, 即出现 PB 现象. 对于一确定的频率失谐  $\Delta\nu$ , 随着  $\theta_p$  的增加, I 类、II 类 PS 开关点对应的注入功率以及 PB 区宽度都呈现减小的趋势, 且  $|\Delta\nu|$  值越大, 尽管 I 类 PS 的开关点所需注入功率更大, 但 PB 区域更宽; 在给定注入功率, 对于特定  $\Delta\nu$ , 通过正向及反向扫描  $\theta_p$  也可观察到 VPOI-1550 nm-VCSEL 输出功率呈现的 PS 以及 PB 现象. 当  $|\Delta\nu|$  较小时, 发生 I 类和 II 类 PS 所要求的  $\theta_p$  近似相同, 因此 PB 区宽度较窄, 而当  $|\Delta\nu|$  较大时, 发生两类 PS 所需的  $\theta_p$  以及 PB 宽度随  $\Delta\nu$  的变化曲线均呈现较大波动. 因此, 在 1550 nm-VCSEL 工作参数给定的条件下, 通过调节可变偏振光注入的注入参量, 可优化 1550 nm-VCSEL 呈现的 PS 及 PB 特性.

**关键词:** VPOI-1550 nm-VCSEL, 偏振开关, 偏振双稳

**PACS:** 42.55.Px, 42.65.-k, 42.65.Pc

**DOI:** 10.7498/aps.65.164204

## 1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 因其自身的独特优势不仅在光通信中的应用前景广阔, 而且可望成为光存储系统、光逻辑系统及并行光计算系统的核心器件<sup>[1-5]</sup>. 由于 VCSELs 的有源区为圆柱形对称结构, 而材料本身又具有弱各向异性, 因此其输出的主导模式在激光器的偏置电流或温度等条件发生变化时, 有可能转换至与其正交的偏振模式, 即发生偏振开关 (polarization switching, PS) 效应<sup>[6-9]</sup>. 另外, VCSELs 较小的有源区体积

和较弱的内部光场使其对外部扰动非常敏感, 从而可通过引入光反馈、光电反馈或者光注入使 VCSELs 呈现 PS<sup>[10-18]</sup>. 已有的研究结果证实, 当引起 VCSELs 呈现 PS 现象的系统参量沿不同路径变化时, 发生 PS 所需的参量条件可能会发生改变, 即导致偏振双稳 (polarization bistability, PB) 的出现<sup>[19-23]</sup>.

近年来, 外部扰动下 VCSELs 的 PS 及 PB 现象因其在光存储、光逻辑门及全光信号整形等技术中的潜在应用背景而受到国内外相关学者的关注<sup>[24-32]</sup>. 例如, Hong 等<sup>[10,24]</sup> 在理论和实验上研

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61275116, 61475127, 61575163) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

究了光反馈对 VCSELs 的 PS 和 PB 的影响, 结果表明在弱反馈情况下, PB 区宽度随反馈强度的增加而减小; Quirce 等<sup>[30]</sup> 实验研究了正交光注入 VCSELs 时的 PB 特性, 通过连续变化注入光波长, 分析了不同偏置电流及注入功率对 PB 区宽度的影响; Gatare 等<sup>[31]</sup> 理论分析了 VCSELs 在正交光注入下连续变化频率失谐时 PB 的性质, 系统研究了线宽增强因子、自旋反转速率对 PB 特性的影响; Chen 等<sup>[32]</sup> 理论研究了 VCSELs 在正交光注入下通过变化注入功率所产生 PS 及 PB 特性, 分析偏置电流和频率失谐对 PB 宽度的影响, 并确定了在由偏置电流和频率失谐构成的参数空间可观测到 PB 现象的区域等. 与此同时, 我们也注意到, 目前采用光注入使 VCSELs 呈现 PS 及 PB 的相关研究中大多采用正交光注入方式, 其主要原因是因为正交光注入能够在较低注入能量就实现 PS, 但是这种方式下所观测到的 PB 宽度相对较小, 有可能对其应用带来一定的局限性. 基于此, 本文尝试研究可变偏振光注入下 1550 nm-VCSEL 的 PS 和 PB 非线性动力学行为. 在可变偏振光注入条件下, 注入线偏振光的偏振方向与 VCSEL 自由运行时主导偏振模式具有一定的夹角 ( $\theta_p$ ), 则注入光中注入到两个偏振模式的份额与  $\theta_p$  的大小有关. 通过调控注入光的偏振角度  $\theta_p$ 、注入强度及频率失谐, 应对激光器的 PS, PB 特性实现一定程度的调控.

## 2 理论模型

图 1 为可变偏振光注入 1550 nm VCSEL (VPOI-1550 nm-VCSELs) 的系统结构示意图, 主激光器 (M-TL) 输出的光通过旋转偏振器 (RP)、光隔离器 (ISO) 和中性密度滤波片 (NDF) 后注入到 1550 nm-VCSEL 中. 1550 nm-VCSEL 中的两个偏振模式 (X 偏振模式和 Y 偏振模式) 经过偏振分束器 (PBS) 被分开. 其中, ISO 保证光的单向传输, RP 用于调节注入光的偏振角度, NDF 用于调节注入光强度.

根据自旋反转模型 (SFM)<sup>[6]</sup>, 描述可变偏振光注入下 1550 nm-VCSEL 动力学特性的速率方程为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{dE_x}{dt} = -(k + \gamma_a)E_x - i(k\alpha + \gamma_p)E_x$$

$$\begin{aligned} & + k(1 + i\alpha)(NE_x + inE_y) \\ & + k_{inj}E_{inj} \sin \theta_p e^{i2\pi(\nu_{inj} - \nu_0)t} \\ & + \sqrt{\frac{\beta_{sp}\gamma_e}{2}} \left( \sqrt{(N+n)}\xi_+(t) \right. \\ & \left. + \sqrt{(N-n)}\xi_-(t) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_y}{dt} = & -(k - \gamma_a)E_y - i(k\alpha - \gamma_p)E_y \\ & + k(1 + i\alpha)(NE_y - inE_x) \\ & + k_{inj}E_{inj} \cos \theta_p e^{i2\pi(\nu_{inj} - \nu_0)t} \\ & + i\sqrt{\frac{\beta_{sp}\gamma_e}{2}} \left( \sqrt{(N-n)}\xi_-(t) \right. \\ & \left. - \sqrt{(N+n)}\xi_+(t) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} = & -\gamma_e[N(1 + |E_x|^2 + |E_y|^2) - \mu \\ & + in(E_yE_x^* - E_xE_y^*)], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} = & -\gamma_s n - \gamma_e[n(|E_x|^2 + |E_y|^2) \\ & + iN(E_yE_x^* - E_xE_y^*)], \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 下标  $x, y$  分别表示 X 偏振模式和 Y 偏振模式,  $E$  为光场的慢变振幅,  $N$  为总载流子密度,  $n$  代表两个自旋反转载流子密度的差值,  $k$  为光场衰减率,  $\alpha$  为线宽增强因子,  $\gamma_e$  为总的载流子衰减率,  $\gamma_a$  和  $\gamma_p$  分别代表有源区介质的线性色散效应和双折射效应,  $\gamma_s$  为自旋反转速率,  $\mu$  为归一化偏置电流.  $k_{inj}$  为注入系数,  $E_{inj}$  为注入场振幅,  $P_{inj} = |E_{inj}|^2$  为注入功率.  $\beta_{sp}$  为自发辐射噪声因子.  $\xi_+$  和  $\xi_-$  为高斯白噪声, 其平均值为 0, 方差为 1.  $\nu_{inj}$  为注入光频率,  $\nu_0$  为 1550 nm-VCSEL 中心频率 ( $\nu_0 = (\nu_x + \nu_y)/2$ ,  $\nu_x$  和  $\nu_y$  分别为 X 和 Y 偏振模式的频率).

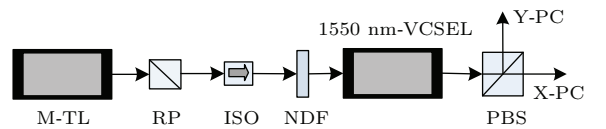


图 1 可变偏振光注入 1550 nm-VCSEL 系统结构示意图. M-TL, 主激光器; RP, 旋转偏振器; ISO, 光隔离器; NDF, 中性密度衰减片; PBS, 偏振分束器.

Fig. 1. Schematic diagram for VPOI-1550 nm-VCSEL. M-TL, master tunable laser; RP, rotating polarizer; ISO, optical isolator; NDF, neutral density filter; PBS, polarization beam splitter.

振幅为  $E_{inj}$  的线偏振光注入到 1550 nm-VCSEL, 其中注入到 X 偏振模式的光场振幅为  $E_{injx} = E_{inj} \sin(\theta_p)$ , 而注入到 Y 偏振模式的光场振幅为  $E_{in jy} = E_{inj} \cos(\theta_p)$ , 其中  $\theta_p$  为注入光偏振角 ( $0^\circ \leq \theta_p \leq 90^\circ$ ), 具体情形如图 2 所示.  $\theta_p = 0^\circ$  对应平行光注入, 而  $\theta_p = 90^\circ$  则对应正交光注入. 在接下来的分析中, 为方便讨论, 我们定义频率失谐为  $\Delta\nu = \nu_{inj} - \nu_x$ .

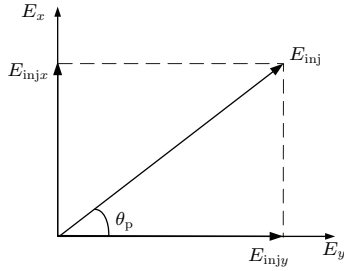


图 2 注入光场分解示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the injected optical field decomposition.

### 3 结果与讨论

利用四阶龙格-库塔法可对速率方程 (1)–(4) 进行数值求解, 所用参数取值为:  $k = 300 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 192.1 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_a = 1 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_e = 1 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\alpha = 3$ ,  $k_{inj} = 300 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\beta_{sp} = 10^{-6}$ ,  $\nu_0 = 1.22 \times 10^{15} \text{ Hz}$  (对应的中心波长为 1543 nm). 在上述参数条件下, 1550 nm-VCSEL 自由运行时的输出功率随归一化电流  $\mu$  的变化如图 3 所示. 图 3 中虚线表示 X 模式, 实线表示 Y 模式. 当归一

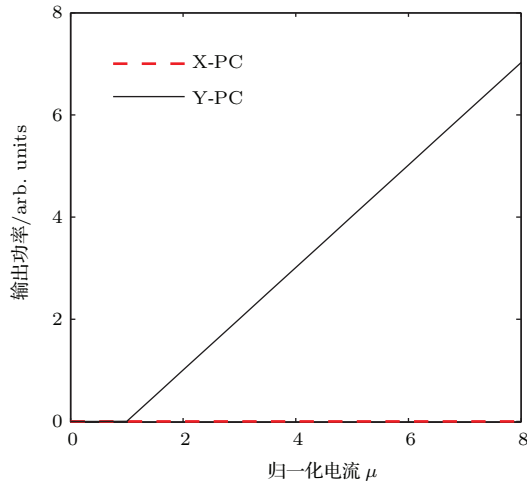


图 3 自由运行时 VCSEL 的  $P$ - $\mu$  曲线

Fig. 3. Polarization-resolved power-current characteristic curve for a free-running VCSEL.

化电流  $\mu$  达到 1 后, Y 偏振模式开始激射, 在图 3 中所给的电流范围内, Y 偏振模式一直占据主导而 X 偏振模式被完全抑制. 在下面的讨论中, 我们固定 1550 nm-VCSEL 的归一化工作电流为  $\mu = 3$ .

#### 3.1 给定 $\Delta\nu$ , $\theta_p$ 取不同值时, 扫描注入光功率产生的 PS 及 PB 特性

对于 VPOI-1550 nm-VCSEL 而言, 注入参量包括注入光功率  $P_{inj}$ 、注入光偏振角  $\theta_p$  以及频率失谐  $\Delta\nu$ . 首先, 我们固定  $\Delta\nu$ , 研究  $\theta_p$  取不同值时, 扫描  $P_{inj}$  所产生的 PS 以及 PB. 数值研究结果发现, 对于一确定的  $\Delta\nu$ ,  $\theta_p$  存在一个阈值  $\theta_{pth}$ , 只有当  $\theta_p$  大于  $\theta_{pth}$  时, 扫描  $P_{inj}$  才能产生 PS. 对于  $\Delta\nu = 10 \text{ GHz}$  的情形,  $\theta_{pth} = 45^\circ$ . 图 4 给出了  $\Delta\nu = 10 \text{ GHz}$ ,  $\theta_p$  分别取  $50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ$  时 VPOI-1550 nm-VCSEL 中两个正交偏振模式的输出功率随注入光功率  $P_{inj}$  连续增加 (实线) 以及连续减小 (虚线) 的变化曲线. 从图 4 中可以看出, 随着  $P_{inj}$  的逐渐增加, Y 偏振模式的输出功率逐渐减小, 而 X 偏振模式的输出功率逐渐增加; 当  $P_{inj}$  增加到  $P_{inj1}$  时, 激光器中的 X 偏振模式将替代 Y 偏振模式而成为主导模式, 而 Y 模式被完全抑制, 即发生 I 类 PS [8]. 继续增大  $P_{inj}$  到 1.5, 这一过程中由于增益饱和导致 X 偏振模式维持一个常数水平; 接着逐渐减小  $P_{inj}$ , 当减小至  $P_{inj2}$  时, 激光器的 Y 偏振模式将激射, 而 X 偏振模式得到抑制, 即发生 II 类 PS [8]. 显然, 正向扫描和反向扫描过程中的 PS 点不重合, 注入功率位于  $P_{inj1}$ — $P_{inj2}$  时, VPOI-1550 nm-VCSEL 呈现 PB 现象.  $\theta_p$  越大, 发生 I 类 PS 所需的注入功率  $P_{inj1}$  越小, 其原因是: X 偏振模式和 Y 偏振模式的注入场振幅之比为  $\tan \theta_p$ ,  $\theta_p$  越大将导致注入到两偏振模式的注入光强度差别越大, 从而可在较小的注入光功率就实现 X 偏振模式的输出功率超过 Y 偏振模式的输出功率而发生 I 类 PS.

为了更全面地反映  $\theta_p$  对 VPOI-1550 nm-VCSEL 偏振开关中 PS 转换点的影响, 图 5 给出了  $\Delta\nu$  取不同值时, 发生 I 类 PS (图 5 (a)) 和 II 类 PS (图 5 (b)) 对应的开关点要求的注入功率随  $\theta_p$  的变化曲线. 由图 5 (a) 可以看出, 随着  $\theta_p$  的增加, 发生 PS 所需的注入功率减小, 其原因如上所述. 对于负  $\Delta\nu$ , 发生 I 类 PS 时, VPOI-1550 nm-VCSEL 主

要表现为注入锁定, 考虑到光注入会导致 1550 nm-VCSEL 中模式的激光频率蓝移, 因此较小的负频率失谐将达到比 0 失谐更好的效果, 从而导致如图中所示当  $\Delta\nu = -2$  GHz 时, I 类 PS 所需的注入功

率值  $P_{inj1}$  相对较小, 这一现象与正交光注入时的结果一致. 对于 II 类 PS,  $|\Delta\nu|$  相对较大时, 正失谐和负失谐得到的结果相差不大, 而  $|\Delta\nu|$  较小时, 负失谐条件下发生 II 类 PS 所需的功率更小.

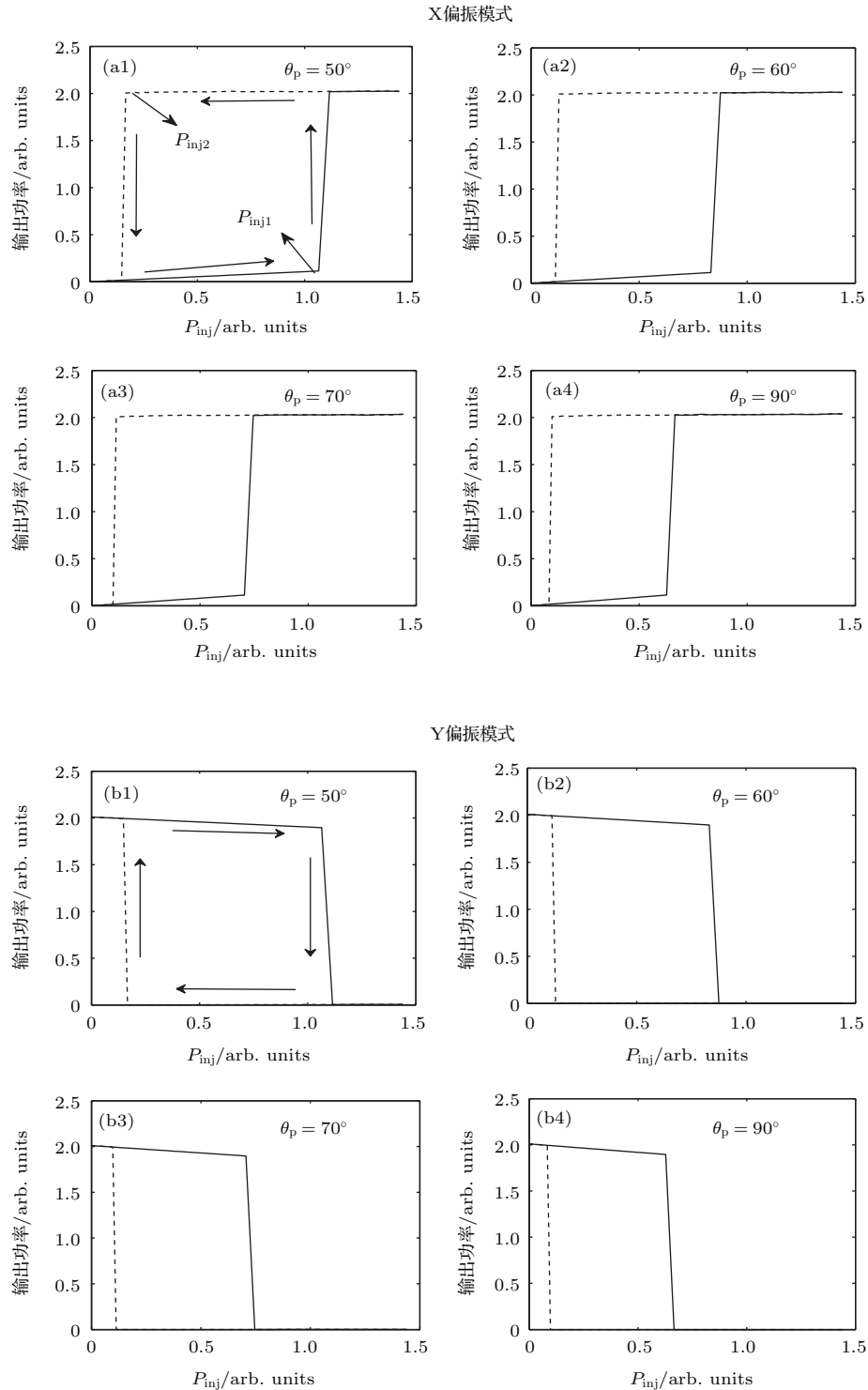


图 4 当  $\Delta\nu = 10$  GHz 时, 不同偏振角度  $\theta_p$  光注入下 1550 nm-VCSEL 中 X 偏振模式和 Y 偏振模式的输出功率随注入光功率  $P_{inj}$  的变化, 图中实线 (虚线) 表示  $P_{inj}$  逐渐增加 (减小)

Fig. 4. Output powers of X polarization-mode and Y polarization-mode in the 1550 nm-VCSEL as a function of injected optical power  $P_{inj}$  under  $\Delta\nu = 10$  GHz for different polarization angle  $\theta_p$ . The solid line (dashed line) corresponds to the case of an increasing (decreasing) injected power  $P_{inj}$ .

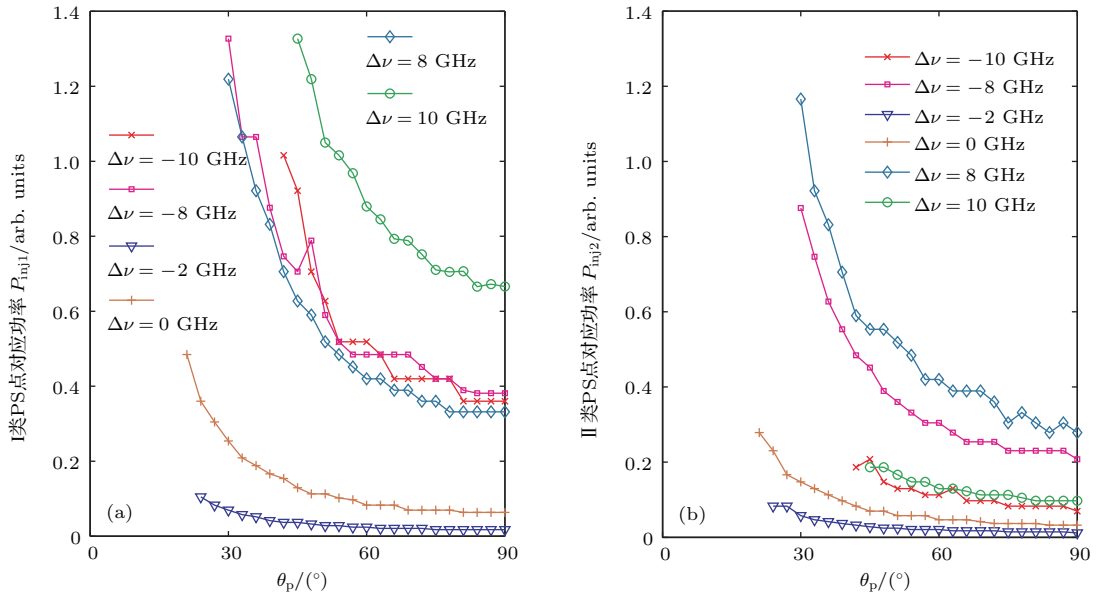


图5 (网刊彩色) 不同频率失谐下, 发生I类PS (a) 和II类PS (b) 所需注入功率  $P_{inj1}$  和  $P_{inj2}$  随注入光偏振角度  $\theta_p$  的变化

Fig. 5. (color online)  $P_{inj1}$  and  $P_{inj2}$  required respectively for generating type I PS (a) and type II PS (b) versus injected optical polarization angle  $\theta_p$  for different frequency detuning.

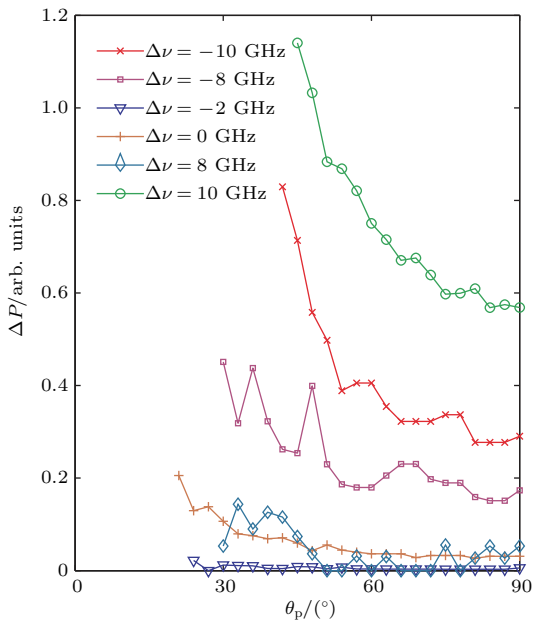


图6 (网刊彩色) 不同频率失谐下, PB区域宽度随注入光偏振角度  $\theta_p$  的变化

Fig. 6. (color online) Variations of the width of PB with injected optical polarization angle  $\theta_p$  for different frequency detuning.

上述I类、II类PS所需注入功率  $P_{inj1}$  和  $P_{inj2}$  随  $\theta_p$  的变化趋势, 导致了PB区域宽度随  $\theta_p$  的变化曲线如图6所示, 图中  $\Delta P = P_{inj1} - P_{inj2}$  为PB区域的宽度. 从图6可以看出, 总体上讲, 随着  $\theta_p$  的增加,  $\Delta P$  呈现逐渐下降的趋势, 且在下降的过程中

伴随着波动. 因此, 相对于正交光注入 ( $\theta_p = 90^\circ$ ), 可变偏振光注入有利于增加PB区域的宽度. 结合图5和图6的结果还可以看出, 小的频率失谐尽管有助于降低I类PS所需的开关点所需功率, 但此时PB区域宽度比较小. 因此, 在实际的应用中, 应根据需要选择合适的  $\Delta\nu$ .

### 3.2 给定注入光功率, $\Delta\nu$ 取不同值时, 扫描 $\theta_p$ 产生的PS及PB特性

接下来, 我们研究在给定注入光功率  $P_{inj}$ , 特定  $\Delta\nu$  下连续变化  $\theta_p$  时激光器呈现的PS及PB特性. 这里, 将  $\theta_p$  由  $0^\circ$  连续增加到  $90^\circ$ , 再从  $90^\circ$  减小至  $0^\circ$ . 图7给出了  $P_{inj} = 2.0$ , 频率失谐  $\Delta\nu$  取不同值时, VPOI-1550 nm-VCSEL中两个正交偏振模式的输出功率随  $\theta_p$  的变化曲线. 从图7中可知, 当  $\theta_p$  正向扫描时, 系统会在  $\theta_{p1}$  处出现I类PS; 而当  $\theta_p$  反向扫描时, 系统会在  $\theta_{p2}$  处出现II类PS, 因此在  $\theta_{p1} > \theta_p > \theta_{p2}$  区域内, 可观察到PB效应. 当  $\Delta\nu = \pm 9$  GHz时, 系统出现I类和II类PS所对应的  $\theta_{p1}$  和  $\theta_{p2}$  均比较小, 对应的PB区域也较窄; 而当  $\Delta\nu = \pm 15$  GHz, 相对于  $\Delta\nu = \pm 9$  GHz而言, 发生I类PS所需的  $\theta_p$  显著增大, 而II类PS所需的  $\theta_p$  增加不明显, 此时的PB区域宽度相对较大.

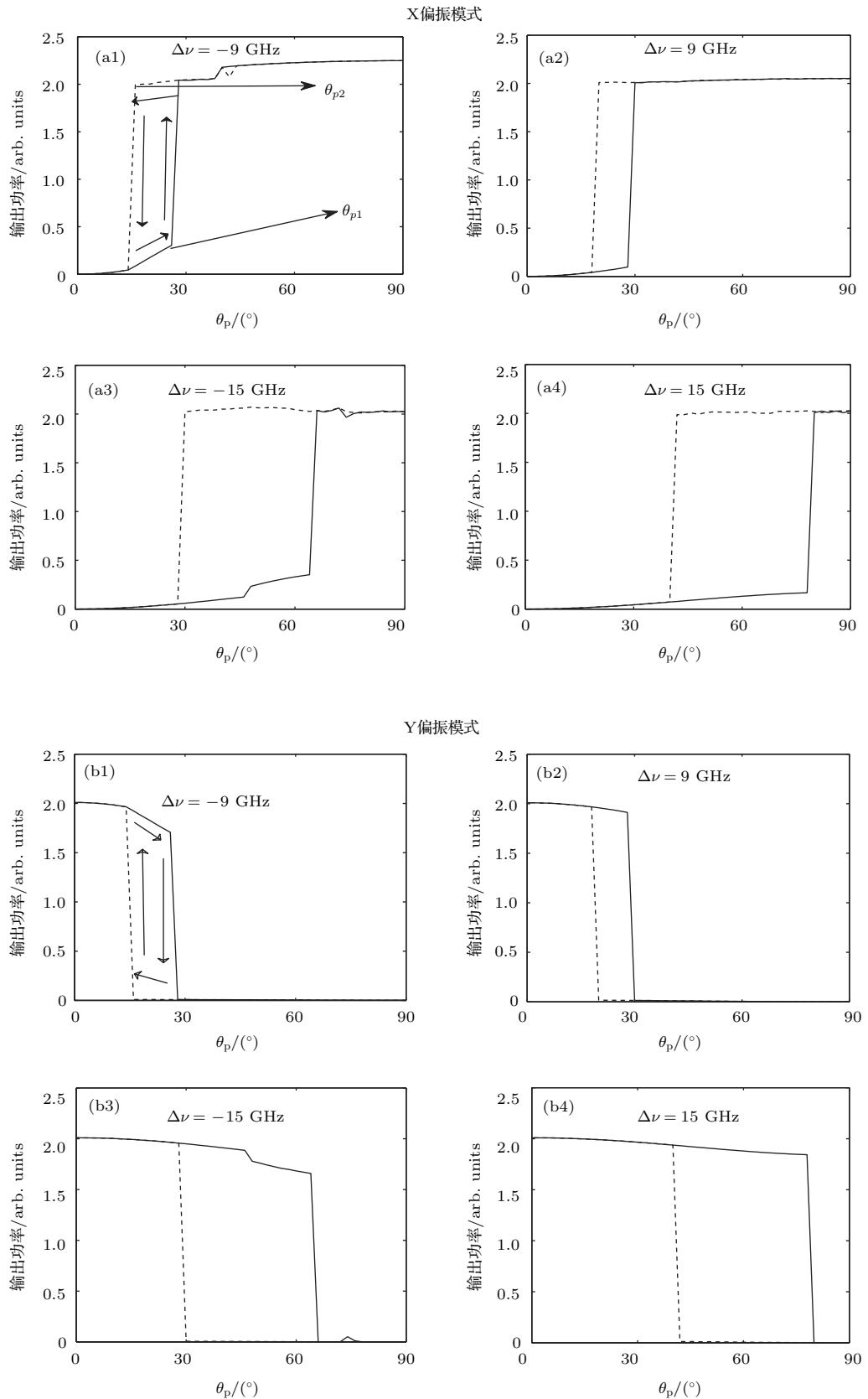


图7 当  $P_{inj} = 2.0$  时, 不同频率失谐  $\Delta\nu$  情况下 1550 nm-VCSEL 中 X 偏振模式和 Y 偏振模式的输出功率随注入光偏振角  $\theta_p$  的变化, 其中实线(虚线)表示  $\theta_p$  的增加(减小)

Fig. 7. Output powers of X polarization-mode and Y polarization-mode in the 1550 nm-VCSEL as a function of injected optical polarization angle  $\theta_p$  under  $P_{inj} = 2.0$  for different frequency detuning  $\Delta\nu$ . The solid line (dashed line) corresponds to the case of an increasing (decreasing) injected optical polarization angle  $\theta_p$ .

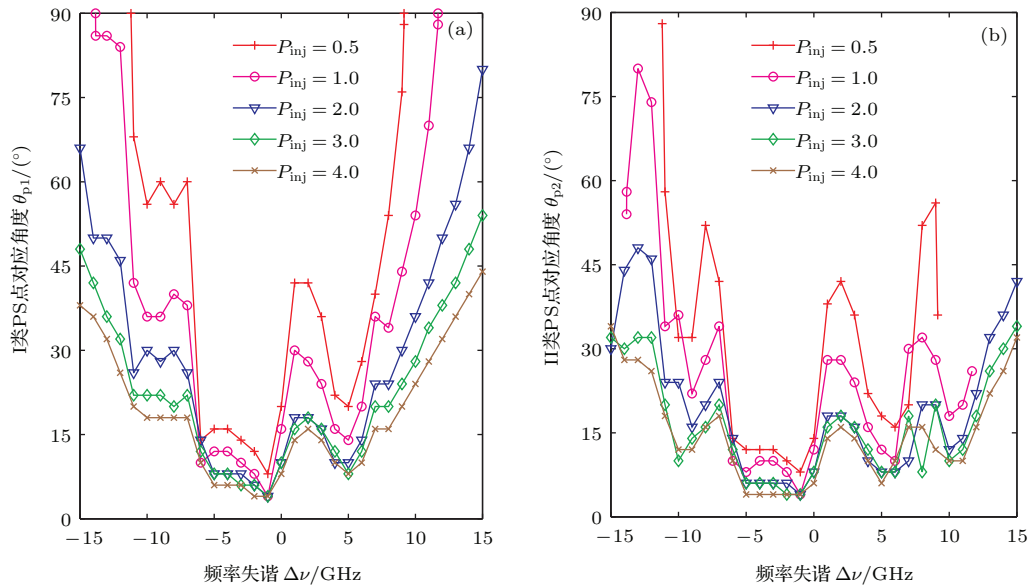


图8 (网刊彩色) 不同注入光功率下, 发生I类PS(a)和II类PS(b)所对应的注入光偏振角 $\theta_{p1}$ 和 $\theta_{p2}$ 随频率失谐 $\Delta\nu$ 的变化

Fig. 8. (color online)  $\theta_{p1}$  and  $\theta_{p2}$  required respectively for generating type I PS (a) and type II PS (b) versus frequency detuning  $\Delta\nu$  for different injected optical power.

以上的研究表明, 对于给定的 $P_{inj}$ , 产生I类PS所需的 $\theta_{p1}$ 以及II类PS所需的 $\theta_{p2}$ 都与 $\Delta\nu$ 的值有关. 下面我们分析在 $P_{inj}$ 取不同值时, 发生I类PS所需的 $\theta_{p1}$ 以及II类PS所需的 $\theta_{p2}$ 随频率失谐的变化. 图8给出了 $P_{inj}$ 分别为0.5, 1.0, 2.0, 3.0和4.0时,  $\theta_{p1}$  (图8(a)),  $\theta_{p2}$  (图8(b))随频率失谐 $\Delta\nu$ 的变化曲线. 从图8(a)中可以看出: 在相同的注入光功率下,  $\theta_{p1}$ 在负频率失谐区域随 $|\Delta\nu|$ 的增加整体呈现逐渐上升的趋势, 在上升过程中伴随着波动, 在 $\Delta\nu = -1$  GHz时,  $\theta_{p1}$ 达到最小值; 在正失谐区域, 随着 $|\Delta\nu|$ 的增加,  $\theta_{p1}$ 先经历一个上升的过程达到一极大值, 然后逐渐下降, 在达到一极小值后再线性地增加. 越强的 $P_{inj}$ ,  $\theta_{p1}$ 会越小, 这是容易理解的. 因为注入X偏振模式和Y偏振模式的分量分别为 $P_{inj} \sin \theta_p$ 以及 $P_{inj} \cos \theta_p$ , 因此在越大的 $P_{inj}$ 条件下, 在较小的 $\theta_p$ 就可以产生I类PS. 相对于I类PS所需的 $\theta_{p1}$ 随 $\Delta\nu$ 的变化规律而言, 图8(b)显示的II类PS所需的 $\theta_{p2}$ 随 $\Delta\nu$ 的变化会更加复杂. 在频率失谐较小的区域( $-5$  GHz  $< \Delta\nu < 5$  GHz),  $\theta_{p2}$ 随 $\Delta\nu$ 的变化趋势与 $\theta_{p1}$ 随 $\Delta\nu$ 的变化趋势非常接近; 但在频率失谐较大的区域( $\Delta\nu < -5$  GHz,  $\Delta\nu > 5$  GHz), 则呈现出更多的波动.

基于上面的结果, 图9给出了不同注入光功率下, PB区域宽度 $\Delta\theta_p (= \theta_{p1} - \theta_{p2})$ 随频率失谐 $\Delta\nu$

的变化关系. 从图9可以看出, 在 $\Delta\nu$ 较小时,  $\Delta\theta_p$ 很小, 这是因为此时发生I类PS和II类PS所需注入场振幅比较弱, 因此较小的 $\theta_p$ 即可实现模式之间的PS, 同时 $\Delta\nu$ 较小时非线性迟滞效应相对较弱, 从而导致呈现的PB区域较窄. 而当 $\Delta\nu$ 较大时,  $\Delta\theta_p$ 随 $\Delta\nu$ 的变化曲线呈现较大波动. 这是由于在VPOI-1550 nm-VCSEL中两个偏振模式的场振幅和位相均受到外光注入的影响, 且两个偏振模式的注入参量还存在差别, 同时两个偏振模式之间又互相耦合, 从而导致 $\Delta\theta_p$ 的变化比较复杂.  $|\Delta\nu|$ 越大, 波动幅度越大.

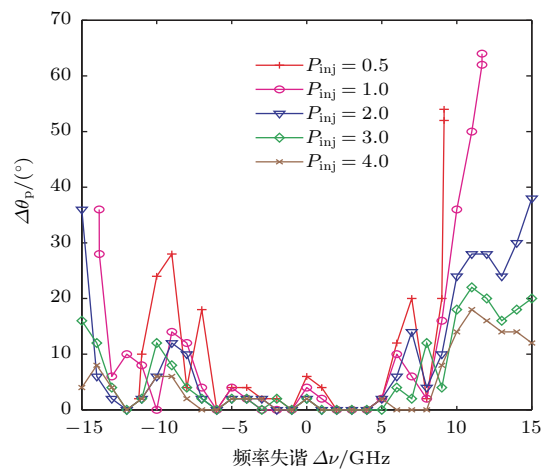


图9 (网刊彩色) 不同注入光功率下, PB区域宽度随频率失谐 $\Delta\nu$ 的变化

Fig. 9. (color online) Variations of PB width with frequency detuning  $\Delta\nu$  for different injected optical power.



## 4 结 论

基于 VCSELs 自旋反转模型, 理论分析了 VPOI-1550 nm-VCSEL 的 PS 和 PB 特性. 研究表明, 当频率失谐一定时, 偏振角  $\theta_p$  足够大时, 通过连续正向和反向扫描注入光功率, VPOI-1550 nm-VCSEL 可出现 I 类 PS 和 II 类 PS. I 类 PS 和 II 类 PS 所需的开关点功率不一致, 从而呈现 PB 效应. 对于不同的频率失谐  $\Delta\nu$ , 随着  $\theta_p$  的增加, I 类、II 类 PS 转换点注入功率和 PB 区域宽度都呈现总体减小的趋势, 越大的  $|\Delta\nu|$ , 所需的 I 类 PS 的转换点注入功率越高, 但 PB 区域越宽; 另外, 在给定的注入光功率条件下, 对于特定的  $\Delta\nu$ , 通过连续正向扫描  $\theta_p$  可观测到 I 类 PS, 而反向扫描则为 II 类 PS, 同时 VPOI-1550 nm-VCSEL 也呈现 PB 现象. 对于一给定的注入光功率,  $|\Delta\nu|$  越小, 非线性迟滞效应越弱, 导致 PB 区域宽度越窄; 而在  $|\Delta\nu|$  较大的区域, 较强的非线性迟滞效应导致 PB 宽度随  $\Delta\nu$  的变化比较复杂. 因此, 在激光器的参数给定的条件下, 通过合理调控注入光的偏振角  $\theta_p$ 、注入强度  $P_{inj}$  和频率失谐  $\Delta\nu$ , 可对 1550 nm-VCSEL 呈现的 PS 和 PB 特性进行优化.

## 参考文献

- [1] Kapon E, Sirbu A 2009 *Nat. Photon.* **3** 27
- [2] Salvade M F, Masoller C, Torre M S 2013 *IEEE J. Quantum Electron.* **49** 886
- [3] Sakaguchi J, Katayama T, Kawaguchi H 2010 *Opt. Express* **18** 12362
- [4] Li S, Guan B L, Shi G Z, Guo X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184208 (in Chinese) [李硕, 关宝璐, 史国柱, 郭霞 2012 物理学报 **61** 184208]
- [5] Perez P, Valle A, Pesquera L, Quirce A 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 1700408
- [6] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
- [7] Martin-Regalado J, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
- [8] Quirce A, Valle A, Pesquera L, Thienpont H, Panajotov K 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 1800207
- [9] 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
- [10] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 2151
- [11] Masoller C, Torre M S 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 483
- [12] 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]
- [13] Deng T, Wu Z M, Xia G Q 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 2075
- [14] Zhong D Z, Ji Y Q, Deng T, Zhou K L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114203 (in Chinese) [钟东洲, 计永强, 邓涛, 周开利 2015 物理学报 **64** 114203]
- [15] Zhong D Z, Ji Y Q, Luo W 2015 *Opt. Express* **23** 29823
- [16] Liao J F, Sun J Q 2013 *Opt. Commun.* **295** 188
- [17] Qiu H Y, Wu Z M, Deng T, He Y, Xia G Q 2016 *Chin. Opt. Lett.* **14** 021401
- [18] Torre M, Hurtado A, Quirce A, Valle A, Pesquera L, Adams M J 2011 *IEEE J. Quantum Electron.* **47** 92
- [19] Guo P, Yang W, Parekh D, Chang-Hasnain C J, Xu A, Chen Z 2013 *Opt. Express* **21** 3125
- [20] Hong Y H, Masoller C, Torre M S, Priyadarshi S, Qader A A, Spencer P S, Shore K A 2010 *Opt. Lett.* **35** 3688
- [21] Salvade M F, Masoller C, Torre M S 2014 *IEEE J. Quantum Electron.* **50** 848
- [22] Hurtado A, Quirce A, Valle A, Pesquera L, Adams M J 2009 *Opt. Express* **17** 23637
- [23] Gatare I, Buesa J, Thienpont H, Panajotov K, Sciamanna M 2006 *Opt. Quantum Electron.* **38** 429
- [24] Hong Y H, Ju R, Spencer P S, Shore K A 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 619
- [25] Paul J, Masoller C, Mandel P, Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2008 *Phys. Rev. A* **77** 043803
- [26] Pan Z G, Jiang S, Dagenais M, Morgan R A, Kojima K, Asom M T, Leibenguth R E, Guth G D, Focht M W 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 2999
- [27] Xiang S, Pan W, Yan L, Luo B, Zou X, Jiang N, Wen K 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 2512
- [28] Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2009 *Opt. Lett.* **34** 365
- [29] Sciamanna M, Panajotov K 2006 *Phys. Rev. A* **73** 023811
- [30] Quirce A, Valle A, Pesquera L 2009 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **21** 1193
- [31] Gatare I, Panajotov K, Sciamanna M 2007 *Phys. Rev. A* **75** 023804
- [32] Chen J J, Xia G Q, Wu Z M 2015 *Chin. Phys. B* **24** 024210

# Investigations on the polarization switching and bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under variable-polarization optical injection\*

Chen Jun<sup>1)</sup> Chen Jian-Jun<sup>1)2)</sup> Wu Zheng-Mao<sup>1)</sup> Jiang Bo<sup>1)</sup> Xia Guang-Qiong<sup>1)†</sup>

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

2) (School of Medical Engineering Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi 830011, China)

( Received 9 April 2016; revised manuscript received 14 June 2016 )

## Abstract

Due to the potential applications in optical storage, optical logic gates and all-optical signal shaping, the polarization switching (PS) and bistability (PB) of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) under external disturbance have attracted much attention. In this work, based on the spin-flip model, the characteristics of PS and PB in a variable-polarization optical injection 1550 nm VCSEL (VPOI-1550 nm-VCSEL) are investigated numerically. In this scheme, the output from a master tunable laser passes through a rotating polarizer, an optical isolator (ISO), and a neutral density filter, then is injected into a 1550 nm-VCSEL. The polarization angle and power of the injection light are controlled by the RP and ISO, respectively. The results show that for a free-running 1550 nm-VCSEL, the parallel polarization-mode (Y polarization-mode) is lasing while the orthogonal polarization-mode (X polarization-mode) is suppressed in the 1550 nm-VCSEL. After introducing a variable-polarization optical injection, for a given frequency detuning  $\Delta\nu$  (defined as the frequency difference between the injection light and the X polarization mode), type I PS occurs during continuously increasing the injection power and type II PS occurs in the inverse process if the polarization angle  $\theta_p$  of the injection light (defined as the angle difference between the polarization direction of injection light and Y polarization mode of the 1550 nm-VCSEL) is large enough. Moreover, the injection power required for generating type I PS is different from that for generating type II PS, namely PB is observed. When  $\Delta\nu$  is fixed, with the increase of  $\theta_p$ , the injection power for the occurrences of the two types PS and the width of PB decrease. For a larger value of  $|\Delta\nu|$ , the injection power for the occurrence of type I PS is higher meanwhile the width of the PB is larger than that for a relatively small value of  $|\Delta\nu|$ . On the other hand, for a given injection power, type I PS, type II PS, and corresponding PB can also be observed in the 1550 nm-VCSEL through continuously increasing and reducing  $\theta_p$  within the range from  $0^\circ$  to  $90^\circ$  under an appropriate  $\Delta\nu$ . For a relatively small  $|\Delta\nu|$ , the value of  $\theta_p$  required for the occurrence of type I is similar to that for type II PS, which results in the very narrow width of the PB. Contrastively, for a relatively large  $|\Delta\nu|$ , the values of  $\theta_p$  required for the occurrences of the two types PS and the width of PB severely fluctuate with the variation of  $\Delta\nu$ . Therefore, for the fixed parameters of the 1550 nm-VCSEL, through adjusting the power and polarization angle of the injection light, the performances of the PS and PB can be optimized. It is expected that this work can provide an effective guidance for optimizing the VCSEL-based bistable devices.

**Keywords:** VPOI-1550nm-VCSEL, polarization switching, polarization bistability

**PACS:** 42.55.Px, 42.65.-k, 42.65.Pc

**DOI:** 10.7498/aps.65.164204

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61275116, 61475127, 61575163).

† Corresponding author. E-mail: [gqxia@swu.edu.cn](mailto:gqxia@swu.edu.cn)