

连续可变偏振光注入垂直腔面发射激光器的偏振开关及双稳特性

陈建军^{1*}, 钟祝强², 李林福³

¹新疆医科大学医学工程技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

²重庆理工大学理学院, 重庆 400054;

³贵州民族大学机械电子工程学院, 贵州 贵阳 550025

摘要 基于垂直腔面发射激光器(VCSELs)的自旋反转模型(SFM),理论研究了连续可变偏振光注入 VCSEL 所产生的偏振开关及双稳特性。研究表明,在合适的注入参数设置下,通过连续正向扫描和反向扫描注入光偏振角,VCSEL 的偏振分量可产生由偏振角度诱导产生的偏振开关(PS)及偏振双稳(PB)效应,且正反向 PS 点位置随扫描周期的变化而发生偏移,进而导致 PB 区域宽度发生改变。当注入强度一定时,正反向 PS 点位置随扫描周期的增大呈现相反的变化趋势,且更小的扫描周期和更大的频率失谐均有助于增加 PB 区域的宽度;对于频率失谐给定的情形,注入光强度的变化对 PS 和 PB 宽度也有着较大的影响,较小的注入强度及扫描周期更易于 PB 宽度的扩展。当给定注入强度和频率失谐时,正反向 PS 点所对应的偏振角度随偏置电流的增强均呈现近似增大的趋势,而 PB 区域宽度则表现出较大的起伏,且扫描周期越大,对应的 PB 宽度越小。此外,自旋反转速率也会影响 VCSEL 输出偏振分量的 PS 和 PB 特性,当注入参数一定时,较小的自旋反转速率更易于产生较大的 PB 宽度。

关键词 激光器; 半导体激光器; 可变偏振光注入; 偏振开关; 偏振双稳; 垂直腔面发射激光器

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0714003

Characteristics of Polarization Switching and Bistability in Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Subject to Continuous Variable-Polarization Optical Injection

Chen Jianjun^{1*}, Zhong Zhuqiang², Li Linfu³

¹ College of Medical Engineering and Technology, Xinjiang Medical University, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

² College of Science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

³ School of Mechatronics Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract Based on a spin-flip model (SFM) of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs), this paper theoretically investigates the characteristics of polarization switching (PS) and polarization bistability (PB) in the VCSEL subject to continuous variable-polarization optical injection. The results show that in the case of reasonable injection parameters, PS and PB effects of the polarization components of the VCSEL can be induced by the polarization angle of the injection light when the angle is continuously scanned along the forward and reverse routes. Meanwhile, the forward and reverse PS points shift with the scan period, leading to a variable width of the PB region. For a given injection intensity, the forward and reverse PS points exhibit opposite changing patterns with the increase in scanning period. Moreover, a shorter scanning period and a larger frequency detuning are both conducive

收稿日期: 2021-07-04; 修回日期: 2021-09-30; 录用日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(31760269)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(2018D01C162)、新疆维吾尔自治区“天山青年”人才基金(2018Q021)

通信作者: *cjliyan@163.com

to a wider PB region. When the frequency detuning is fixed, the change in injection light intensity also has a great influence on the PS position and the PB width. A weak injection intensity and a short scanning period are both conducive to expanding the PB width. When injection intensity and frequency detuning are fixed, both the polarization angles corresponding to forward and reverse PS points demonstrate an approximate uptrend with an increasing bias current, whereas the width of the PB region experiences violent fluctuations. Furthermore, a longer scanning period leads to a smaller PB width. Additionally, the spin-flip rate also has an impact on the PS and PB characteristics of the output polarization components of the VCSEL. A lower spin-flip rate is more liable to result in a larger PB width for given injection parameters.

Key words lasers; semiconductor laser; variable-polarization optical injection; polarization switching; polarization bistability; vertical-cavity surface-emitting laser

1 引 言

在过去的几十年里,非线性开关及双稳态的现象已经出现在基础科学的不同领域(如光学、电子学、化学、生物学等),正成为当前前沿科学研究的热点之一^[1-5]。在光学系统中,非线性开关主要源于光场模式的不稳定性,当系统参数沿某一路径变化时,其输出光场模式或状态出现跳变,从而产生开关现象。而如果参数变量沿不同路径连续动态地变化,受非线性迟滞效应的影响,系统的开关位置并不重合,进而诱导产生光学双稳态^[6]。此类光学系统的主要特征是在给定系统参数的条件下存在两种不同的输出功率或状态,而系统演化的最终状态则主要取决于初始条件以及演化路径。已有研究表明,得益于低成本、低阈值、单纵模、高光纤耦合效率、高可靠性等独特的优点,基于垂直腔面发射激光器(VCSELs)的光学开关及双稳器件正吸引更多研究人员的注意,不同参数条件下 VCSEL 输出的光学特性也一直是激光研究领域的前沿课题^[7-11]。现今,随着半导体新材料的出现及新制作技术的提升,VCSEL 得到长足的发展并日趋成熟,已逐渐成为现阶段光信息处理、光存储、光学逻辑门等领域的关键器件^[12-14]。

相比于传统的半导体激光器,VCSEL 有源区材料和腔体的各向异性弱,其输出光场优先沿两个正交晶体轴中的一个产生偏振。调整偏置电流和工作温度或增加内外部参数扰动,很容易诱导光场偏振态在相互正交的偏振模式转换,产生 VCSEL 特有的偏振开关(PS)^[15-18]。当沿不同路径扫描系统的特定可控参量,VCSEL 在同一系统参数设置下发生的 PS 可能并不重合,从而出现偏振双稳(PB)效应^[19-20]。众所周知,外部光注入 VCSEL 是获得 PS 和 PB 的有效方法。其中光注入的方式主要分为正交光注入和平行光注入,这两种注入方式均已在理论和实验方面得到详细的研究^[18-19,21-26]。通常,光

注入 VCSEL 系统的过程主要有两个控制参量:注入强度和频率失谐。目前的理论和实验研究结果表明,当沿不同路径连续改变注入光强度,系统中出现强度诱导的 PS 和 PB 现象;当沿不同路径改变注入光频率(或频率失谐),系统中也会出现频率诱导的 PB 现象。如果考虑光注入方式介于正交光注入和平行光注入之间(即光以一定偏振角注入 VCSEL),则 VCSEL 产生的 PS 和 PB 特性将表现出不同于正交或平行光注入的情形。Al-Seyab 等^[27-28]从实验和理论方面研究了注入光偏振角对 VCSEL 偏振特性的作用,发现偏振角的不同对 VCSEL 的偏振输出有较大的影响。陈俊等^[29]理论研究了可变偏振光注入 VCSEL 的偏振输出特征,表明通过调节光注入偏振角可合理调控 VCSEL 呈现的 PS 及 PB 效应。近期,本课题组采用可变偏振光注入 VCSEL 架构,通过实验和数值研究了频率诱导的 PB 现象,发现其宽度严格受控于注入光偏振角度和偏置电流^[30-31]。以上研究表明,通过适当选择可变偏振光注入的角度以及其他注入参量,可以有效调控 VCSEL 偏振模式输出的 PS 和 PB 特性。

值得注意的是,目前针对可变偏振光注入 VCSEL 产生 PS 和 PB 效应的研究大多预先设定注入光的偏振角度,通过连续扫描注入强度或频率来调控偏振模式的输出。实际上,作为可控的注入参量,连续扫描注入光偏振角可提供另一种灵活的偏振输出控制策略,其不仅可丰富 PS 和 PB 效应的调控手段,还有可能满足特殊条件下的应用需求。截至目前,基于连续扫描注入光偏振角产生 PS 和 PB 的相关研究仍然较少,进一步对其进行分析有助于优化此类系统产生 PS 和 PB 特性的参数设置。基于此,本文采用了修正后的自旋反转模型(SFM),数值分析了连续扫描可变偏振光注入架构下 VCSEL 偏振模式输出的 PS 和 PB 特性,通过调控注入光偏振角的扫描周期及其他注入参数,研究不同注入条件对 PS 和 PB 的影响。

2 理论模型

图 1 为连续可变偏振光注入 VCSEL 的系统结构示意图。首先由一个可调谐半导体激光器 (T-SL) 产生连续光信号, 该信号经过可调节衰减器 (VA)、偏振控制器 1 (PC1) 和光环行器 (OC) 后, 被光纤耦合器 (FC) 耦合进 VCSEL。在此注入条件下, VCSEL 的输出经 OC、PC2 以及偏振分束器 (PBS) 后成为两个正交的 x 偏振分量 (x -PC) 和 y 偏振分量 (y -PC)。在系统架构中, OC 可以用来确保光的单向注入, 注入通路上的 PC1 用于连续控制注入光偏振角, PC2 和 PBS 的联合使用可确保输出光信号被分解为 x -PC 和 y -PC, VA 用来控制注入光强度。

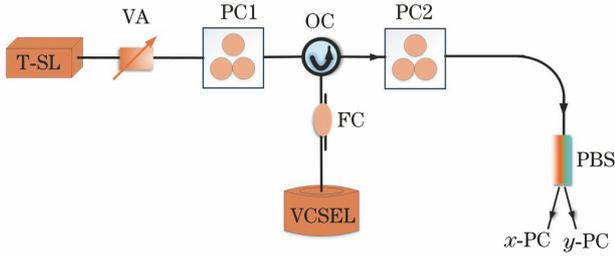


图 1 连续可变偏振光注入 VCSEL 的系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous variable-polarization light injected into VCSEL

在本文中, 考虑到注入方式为连续可变偏振光注入, 注入光经由 PC1 后变为沿 VCSEL 两个正交的偏振分量方向注入, SFM 经扩展后可用于描述连续可变光注入情形, 此时 VCSEL 输出特性的速率方程描述为^[32]

$$\frac{dE_x}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N - 1)E_x + inE_y] - (\gamma_\alpha + i\gamma_p)E_x + F_x + \eta_{inj}E_{inj} \sin \theta_p \exp(i2\pi\nu_{inj}t - i2\pi\nu_0t), \quad (1)$$

$$\frac{dE_y}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N - 1)E_y - inE_x] + (\gamma_\alpha + i\gamma_p)E_y + F_y + \eta_{inj}E_{inj} \cos \theta_p \exp(i2\pi\nu_{inj}t - i2\pi\nu_0t), \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma_c[N(1 + |E_x|^2 + |E_y|^2) - u + in(E_yE_x^* - E_xE_y^*)], \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma_s n - \gamma_c[n(|E_x|^2 + |E_y|^2) + in(E_yE_x^* - E_xE_y^*)], \quad (4)$$

式中: 下标 x 和 y 分别表示 VCSEL 的两个正交偏振分量 x -PC 和 y -PC; E 为 VCSEL 输出的光场慢

变复振幅; N 为导带和价带总的反转载流子数密度; n 为两个自旋反转能级上的载流子密度差值; α 为线宽增强因子; k 为谐振腔内光场衰减速率; γ_c 为总的载流子衰减速率; γ_α 为线性二向色性系数; γ_p 为线性双折射系数; γ_s 为自旋反转速率; u 为激光器介质有源区的归一化偏置电流; η_{inj} 为注入系数; E_{inj} 为注入光场的振幅; θ_p 为注入光偏振角, 即注入光场方向与 VCSEL 的 y -PC 之间的角度; $\nu_0 = (\nu_x + \nu_y)/2$ 为 VCSEL 的中心频率, ν_x 为 x -PC 的频率, ν_y 为 y -PC 的频率; ν_{inj} 为外部注入光频率; F_x 和 F_y 分别为 x -PC 和 y -PC 上的朗之万噪声, 可分别表示为^[33]

$$F_x = \sqrt{\beta_{sp}/2}(\sqrt{N+n}\xi_1 + \sqrt{N-n}\xi_2), \quad (5)$$

$$F_y = -i\sqrt{\beta_{sp}/2}(\sqrt{N+n}\xi_1 - \sqrt{N-n}\xi_2), \quad (6)$$

式中: β_{sp} 为噪声源自发辐射速率; ξ_1 和 ξ_2 分别为具有零平均值和归一化的高斯白噪声源。

当系统的内部参数、注入光强度和系统频率失谐等控制参数一定时, 注入光偏振角 θ_p 的变化会显著影响注入 VCSEL 两个正交偏振分量的强度, 如果沿不同路径连续动态地改变 θ_p , 则可能在两个偏振分量之间产生由连续可变扫描 θ_p 诱导的 PS 和 PB 现象。图 2 给出了连续可变光场分解为 VCSEL 内部光场的示意图以及在两个连续扫描周期内 θ_p 随时间的变化关系图。在图 2(a) 中, E_x 和 E_y 代表 VCSEL 的 x -PC 和 y -PC 的慢变振幅。总注入光场 (对应于注入 VCSEL 的光场强度 $P_{inj} = |E_{inj}|^2$) 沿某一偏振方向注入 VCSEL, θ_p 为注入光场偏振方向与 VCSEL 的 y -PC 之间的夹角, 因此注入光分解至 x -PC 的振幅为 $E_{injx} = E_{inj} \sin \theta_p$ (对应于注入强度 $P_{injx} = |E_{injx}|^2$), 分解至 y -PC 的振幅为 $E_{in jy} = E_{inj} \cos \theta_p$ (对应于注入强度 $P_{injy} = |E_{in jy}|^2$)。 θ_p 从 0° 连续增加到 90° 的过程定义为正向扫描, 反之则称为反向扫描。在其他参量不变的情况下, θ_p 在正向扫描周期 ($0 \sim T$) 内连续动态地由 0° 线性增加到 90° , 其对应于图 2(a) 中的正向扫描情形; 在反向扫描周期时间 ($T \sim 2T$) 内, θ_p 连续动态地由 90° 线性减小到 0° , 其对应于图 2(a) 中的反向扫描情形。

3 结果与讨论

连续可变偏振光注入 VCSEL 的速率方程 [(1)~(4)式] 可通过四阶龙格-库塔算法进行求解, 数值模拟过程所用的系统参数取值如下^[18]: $\alpha = 3$, $k = 300 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_c = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_\alpha = 1 \text{ ns}^{-1}$,

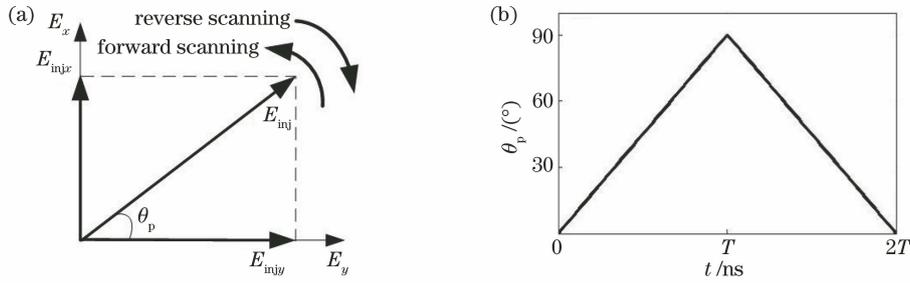


图 2 注入光场分布及其注入偏振角随时间的变化。(a)连续可变注入光场分解为 VCSEL 两个正交偏振分量的示意图;(b)连续两个扫描周期内 θ_p 随扫描时间的变化

Fig. 2 Distribution of injected optical field and change of injected polarization angle with time. (a) Diagram of continuously variable injection light field decomposed in two orthogonal polarized components in VCSEL; (b) polarization angle θ_p of optical injection as a function of scanning time within two consecutive scanning periods

$\gamma_p = 192.1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$, $\eta_{inj} = 300 \text{ ns}^{-1}$, $\beta_{sp} = 10^{-6}$, $\nu_0 = 1.9433 \times 10^{15} \text{ Hz}$ (对应的 VCSEL 中心波长为 1543 nm), $u = 3.0$ 。在没有特殊说明时,文中各参数均使用以上数值。在上述参数设置下,自由运行 VCSEL 的 y -PC 输出功率在归一化电流 u 达到 1 之后始终处于激射状态,而 x -PC 输出则一直处于抑制状态^[29]。为了表述方便,用 $\Delta\nu = \nu_{inj} - \nu_x$ 来表示注入光与 VCSEL 之间的频率失谐。

图 3 给出了 $P_{inj} = 0.01$, $\Delta\nu = -8 \text{ GHz}$ 且 $T = 1000 \text{ ns}$ 时,VCSEL 输出 x -PC 和 y -PC 的强度极大值和极小值随 θ_p 变化时的分岔图。其中,图 3(a)对应 θ_p 从 0° 逐渐增加至 90° 的情形,图 3(b)对应 θ_p 从 90° 减小至 0° 的情形。由图 3(a)可以看出,初始时刻 y -PC 处于主激射状态而 x -PC 被抑制。随着 θ_p

的增加(由 0° 增加到 30°), y -PC 会经历单周期振荡、倍周期分岔和混沌等一系列动态演化过程,同时 x -PC 逐渐开始激射,这是由于 θ_p 增加,分解到 x -PC 的注入光强逐渐增大,外部光场与 VCSEL 腔内光场非线性相互作用也在增强。随着 θ_p 的继续增加(由 30° 增加至 42°),两个正交的偏振分量竞争非常激烈,呈现出复杂的混沌共存特征;当 θ_p 进一步增加时,主激射状态由 y -PC 跳变为 x -PC,出现明显的 PS 效应。由图 3(b)可以看出,当 θ_p 从 90° 减小至 0° , x -PC 和 y -PC 的强度极值分叉图会经历与图 3(a)大致相反的演化过程,受初始条件的改变、VCSEL 中增益介质折射率的非线性变化等相互作用的影响,系统产生正向 PS 和反向 PS 所对应的 θ_p 位置并不相同,从而出现角度诱导的 PB 现象。

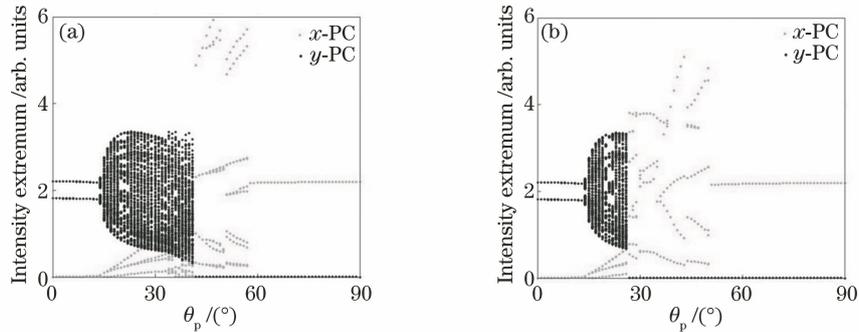


图 3 当 $P_{inj} = 0.01$, $\Delta\nu = -8 \text{ GHz}$ 且 $T = 1000 \text{ ns}$ 时,VCSEL 中 x -PC 和 y -PC 的强度极值随 θ_p 变化的分岔图。(a)正向扫描 θ_p ; (b)反向扫描 θ_p

Fig. 3 Bifurcation diagrams of maxima and minima of x -PC and y -PC of VCSEL as functions of θ_p when $P_{inj} = 0.01$, $\Delta\nu = -8 \text{ GHz}$, and $T = 1000 \text{ ns}$. (a) Scanning θ_p along forward route; (b) scanning θ_p along reverse route

3.1 时变扫描 θ_p 产生的 PS 和 PB 特性

首先,固定注入光强度 P_{inj} 和频率失谐 $\Delta\nu$,连续动态地改变 θ_p ,将可控参量 θ_p 线性地由 0° 增加到 90° (正向扫描,扫描周期为 $0 \sim T$),随后线性地将 θ_p 由 90° 减小到 0° (反向扫描,扫描周期为 $T \sim 2T$),正

向扫描 θ_p 和反向扫描 θ_p 的周期均为 T ,结果如图 4 所示。图 4 中, $P_{inj} = 0.01$ 且 $\Delta\nu = -8 \text{ GHz}$ 。其中,图 4(a1)、(b1),图 4(a2)、(b2),图 4(a3)、(b3)分别对应 T 为 100,1000,10000 ns 3 种不同的扫描周期。由图 4(a1)、(b1)可以看出,当 $T = 100 \text{ ns}$ 时, θ_p

由 0° 增加到 90° 的过程中, x -PC 和 y -PC 之间的 PS 现象将会在某一特定的 θ_{p1} 处出现, 此时 x -PC 将从抑制状态转换为激射状态; 与此同时, y -PC 经历相反的强度转换过程并伴随着高消光比。随后, θ_p 再以同样的扫描时间间隔由 90° 减小到 0° , 两个偏振分量之间的 PS 现象将再次发生, 且出现在另一个特定的 θ_{p2} 处。这是由于初始条件与扫描路径的不同, 系统在迟滞效应的作用下发生 PS 的位置不重合, 即出现 PB 现象。这里, 将正反向扫描过程中 PS 位置所对应的注入光偏振角差值 $\Delta\theta_{p12}$ ($\Delta\theta_{p12} =$

$|\theta_{p1} - \theta_{p2}|$) 定义为 PB 区域的宽度。类似地, 由图 4 (a2)、(b2) 和图 4 (a3)、(b3) 可以看出, 当 $T = 1000$ ns 和 $T = 10000$ ns 时, 正反向扫描 θ_p 均可以产生由注入光偏振角度诱导产生的 PS 和 PB 现象。对比这 3 种不同的扫描周期, 可以看出, 较大的扫描周期 T (即较小的扫描速率 $1/T$) 更易于形成较窄的双稳宽度。以上结果表明, 系统在其他参数一定的情况下, 可以通过连续改变注入光偏振角来实现 PS 和 PB, 且 PB 宽度可通过注入光偏振角的扫描周期或扫描速率来控制。

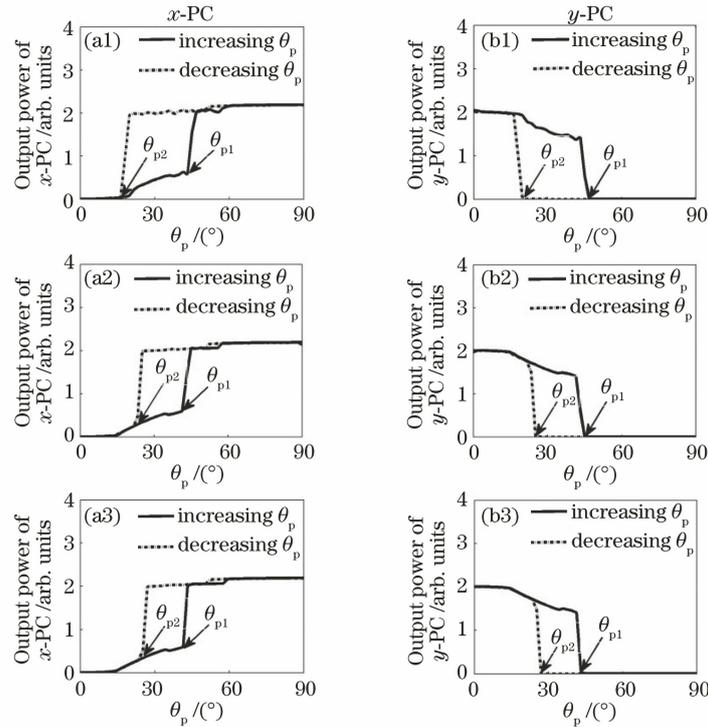


图 4 当 $P_{inj} = 0.01$ 、 $\Delta\nu = -8$ GHz 时, 不同扫描周期 T 情况下 VCSEL 中 x -PC 和 y -PC 的输出功率随 θ_p 的变化曲线。(a1)(b1) $T = 100$ ns; (a2)(b2) $T = 1000$ ns; (a3)(b3) $T = 10000$ ns

Fig. 4 Output power of x -PC and y -PC of VCSEL as a function of θ_p for different T when $P_{inj} = 0.01$ and $\Delta\nu = -8$ GHz. (a1)(b1) $T = 100$ ns; (a2)(b2) $T = 1000$ ns; (a3)(b3) $T = 10000$ ns

为了更系统地研究扫描周期 T 对连续可变偏振光注入 VCSEL 的 PS 位置和 PB 宽度的影响, 图 5 给出了 $P_{inj} = 0.01$ 时, 正反向扫描 θ_p 过程中, VCSEL 两个偏振分量正反向 PS 位置及 PB 宽度随扫描周期 T 的变化关系, 图中横坐标为对数坐标, 纵坐标为线性坐标。由图 5 (a) 可知, 当 $\Delta\nu = -8$ GHz 时, 正向扫描和反向扫描 θ_p 所产生的 PS 点对应的 θ_{p1} 和 θ_{p2} 并不重合, 且在考察的 T 范围 (100 ns $\leq T \leq 10000$ ns) 内, θ_{p1} 随扫描周期 T 的增大而缓慢减小, 并最终趋于一个固定值; 相反地, 在扫描周期范围内, θ_{p2} 随扫描周期 T 的增大缓慢增大, 之后逐渐稳定在一个固定值。图 5 (b) 给出了与

图 5 (a) 相同条件下, PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 随 T 的变化趋势。可以看出, 随着 T 的增大, 正向 PS 点位置 θ_{p1} 逐渐减小、反向 PS 点位置 θ_{p2} 逐渐增大, PB 区域的宽度被压窄; 而当 T 足够大时, 系统的迟滞效应趋于稳定, 由此产生的 PB 宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 逐渐稳定在一个固定值。图 5 (c) 给出了不同的 $\Delta\nu$ 条件下, PB 宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 随 T 的变化趋势。由图中可以看出, 对于不同的 $\Delta\nu$, 随着 T 的增加, $\Delta\theta_{p12}$ 的变化趋势都与图 5 (b) 相同, 即通过调节扫描周期, 可灵活地控制偏振分量的 PB 区域宽度。另一方面, 对于绝对值较小的频率失谐 ($\Delta\nu$ 为 -6 GHz 和 6 GHz), $\Delta\theta_{p12}$ 在整个 T 的考察范围内均相对较小; 而当频率失谐

较大 ($\Delta\nu$ 为 -8 GHz 和 8 GHz 或 $\Delta\nu$ 为 -10 GHz 和 10 GHz) 时, $\Delta\theta_{p12}$ 在整个 T 的考察范围内显著增大。这是由于 $\Delta\nu$ 越大, VCSEL 的 x -PC 和 y -PC

产生 PS 时所需的注入强度越大, 非线性迟滞效应越显著, 即 PS 需要在较大的 θ_p 值才能实现, 这也有助于系统获取更大的 PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 。

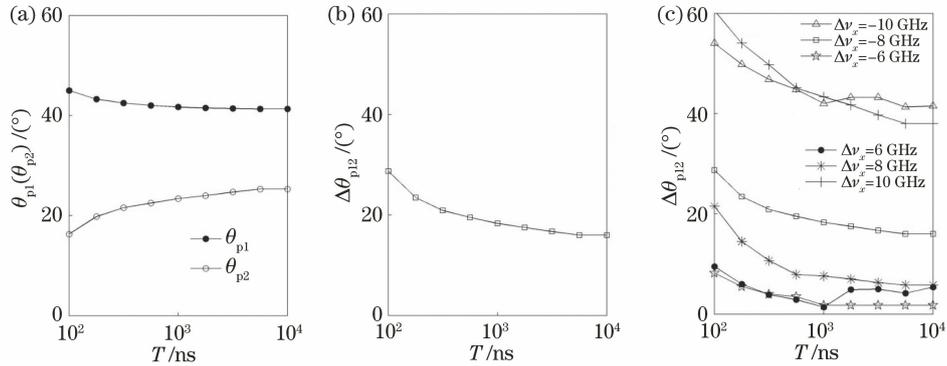


图 5 当 $P_{inj}=0.01$ 时, θ_{p1} 、 θ_{p2} 和 $\Delta\theta_{p12}$ 随 T 的变化曲线。(a) $\Delta\nu=-8$ GHz, θ_{p1} 和 θ_{p2} 随 T 的变化曲线; (b) $\Delta\nu=-8$ GHz, $\Delta\theta_{p12}$ 随 T 的变化曲线; (c) 不同 $\Delta\nu$ 时, $\Delta\theta_{p12}$ 随 T 的变化曲线

Fig. 5 Variations of θ_{p1} , θ_{p2} , and $\Delta\theta_{p12}$ with T when $P_{inj}=0.01$. (a) Variations of θ_{p1} and θ_{p2} with T when $\Delta\nu=-8$ GHz; (b) variation of $\Delta\theta_{p12}$ with T when $\Delta\nu=-8$ GHz; (c) variation of $\Delta\theta_{p12}$ with T for different $\Delta\nu$

3.2 P_{inj} 对时变扫描 θ_p 产生 PS 和 PB 的影响

为探究偏振光注入强度 P_{inj} 对扫描 θ_p 产生 PS 和 PB 特性的影响, 图 6 给出了扫描周期 T 和频率失谐 $\Delta\nu$ 一定时, 3 种不同注入强度下 VCSEL 的 x -PC 和 y -PC 输出功率随 θ_p 的变化曲线。其中, 图 6

(a1)、(b1), 图 6(a2)、(b2) 和图 6(a3)、(b3) 分别对应于 $P_{inj}=0.005$ 、 $P_{inj}=0.010$ 和 $P_{inj}=0.020$ 3 种不同的注入强度。从图 6(a1)、(b1) 可以看出, 对于 $P_{inj}=0.005$ 的情形, 正向扫描和反向扫描 θ_p 所形成 PS 点的位置 θ_{p1} 和 θ_{p2} 相对较大, 并由此形成较

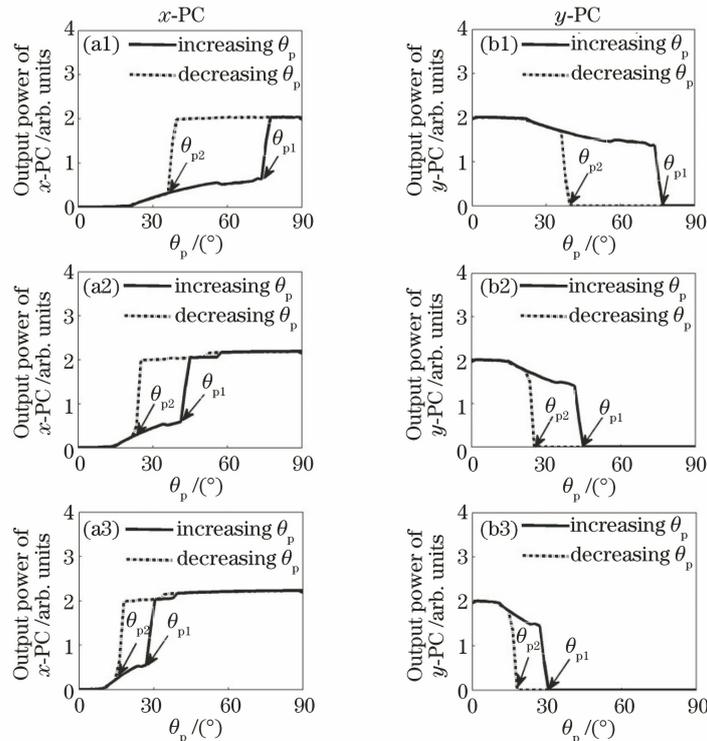


图 6 当 $\Delta\nu=-8$ GHz、 $T=1000$ ns 时, 不同注入强度 P_{inj} 情况下 VCSEL 中 x -PC 和 y -PC 的输出功率随 θ_p 的变化曲线。(a1)(b1) $P_{inj}=0.005$; (a2)(b2) $P_{inj}=0.010$; (a3)(b3) $P_{inj}=0.020$

Fig. 6 Output power of x -PC and y -PC of VCSEL as a function of θ_p for different P_{inj} when $\Delta\nu=-8$ GHz and $T=1000$ ns. (a1)(b1) $P_{inj}=0.005$; (a2)(b2) $P_{inj}=0.010$; (a3)(b3) $P_{inj}=0.020$

大的 PB 宽度。当 $P_{inj}=0.010$ 时,如图 6(a2)、(b2) 所示,形成 PS 点的位置 θ_{p1} 和 θ_{p2} 都有所减小,所对应的 PB 区域宽度较图 6(a1)、(b1) 也显著减小。当 $P_{inj}=0.020$ 时,由图 6(a3)、(b3) 可知,较大的注入强度会导致 θ_{p1} 和 θ_{p2} 进一步减小,且 PB 区域宽度进一步减小。其原因可以解释为:当扫描 θ_p 时,注入强度 P_{inj} 越大,相应分解到被抑制的 x -PC 注入光强 P_{inix} 就越大,从而导致 VCSEL 的偏振分量可在较小的 θ_{p1} 和 θ_{p2} 实现 PS,并由此产生较小的 PB 区域宽度。

接下来,为了更全面地反映注入强度 P_{inj} 和扫描周期 T 对 VCSEL 偏振分量输出特性的影响,图 7 进一步描绘了正反向扫描 θ_p 过程中,VCSEL 的两个偏振分量 PS 位置及 PB 宽度与注入强度 P_{inj} 和扫描周期 T 之间的关系。由图 7(a) 可知,当

$\Delta\nu=-8$ GHz 且 $T=1000$ ns 时,正向扫描和反向扫描 θ_p 所产生的 PS 点对应的注入光偏振角 θ_{p1} 和 θ_{p2} 不重合,且在所考察的 P_{inj} 范围($0.005 \leq P_{inj} \leq 0.030$)内,随着 P_{inj} 的增大, θ_{p1} 和 θ_{p2} 均呈现减小的趋势,并各自逐渐减小至稳定值。图 7(b) 给出了与图 7(a) 相同条件下,PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 随注入强度 P_{inj} 的变化趋势。可以看出,随着 P_{inj} 的增加, $\Delta\theta_{p12}$ 先是迅速减小,之后近似线性地缓慢减小,并逐渐减小至某一稳定值。图 7(c) 给出了不同的 T 条件下,PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 随注入强度 P_{inj} 的变化趋势。由图中可以看出,对于 $T=100$ ns、 $T=1000$ ns 和 $T=10000$ ns 3 种不同的扫描时间,随着 P_{inj} 的增加, $\Delta\theta_{p12}$ 的变化趋势近似相同。另外,相较于较大的 T 的情形,较小的 T 更有助于获得较大的 $\Delta\theta_{p12}$ 。

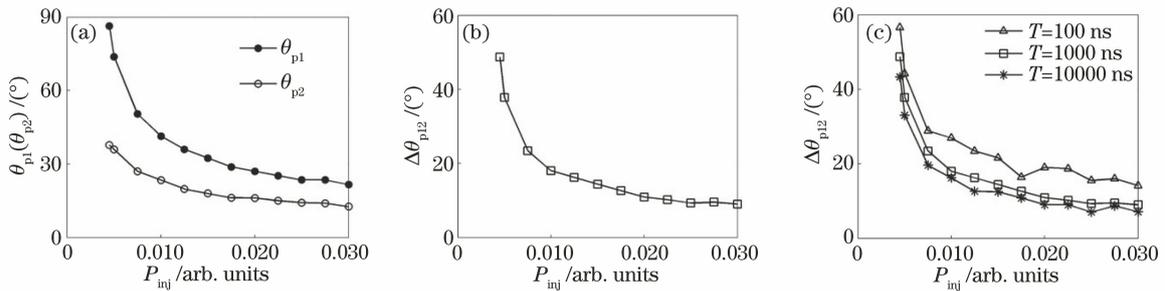


图 7 当 $\Delta\nu=-8$ GHz 时, θ_{p1} 、 θ_{p2} 和 $\Delta\theta_{p12}$ 随 P_{inj} 的变化曲线。(a) $T=1000$ ns, θ_{p1} 和 θ_{p2} 随 P_{inj} 的变化曲线; (b) $T=1000$ ns, $\Delta\theta_{p12}$ 随 P_{inj} 的变化曲线;(c)不同 T 时, $\Delta\theta_{p12}$ 随 P_{inj} 的变化曲线

Fig. 7 Variations of θ_{p1} , θ_{p2} , and $\Delta\theta_{p12}$ with P_{inj} when $\Delta\nu=-8$ GHz. (a) Variations of θ_{p1} and θ_{p2} with P_{inj} for $T=1000$ ns; (b) variation of $\Delta\theta_{p12}$ with P_{inj} when $T=1000$ ns; (c) variation of $\Delta\theta_{p12}$ with P_{inj} for different T

3.3 u 对时变扫描 θ_p 产生的 PS 和 PB 的影响

考虑到偏置电流的变化会改变系统的初始条件,并可能影响 VCSEL 两个正交偏置模式的 PS 和 PB 特性,故有必要研究偏置电流对扫描 θ_p 产生 PS 和 PB 的影响。图 8 给出了扫描周期 T 、频率失谐 $\Delta\nu$,以及注入强度 P_{inj} 一定时,不同偏置电流 u 情况下 VCSEL 中 x -PC 和 y -PC 的输出功率随 θ_p 的变化曲线。其中,图 8(a1)、(b1),图 8(a2)、(b2) 和图 8(a3)、(b3) 分别对应 $u=1.6$ 、 $u=3.0$ 、 $u=4.0$ 这 3 种不同偏置电流。从图 8(a1)、(b1) 可以看出,当偏置电流较小($u=1.6$)时,VCSEL 的 x -PC 和 y -PC 在达到激射状态时输出功率相对较低,正向扫描和反向扫描 θ_p 所形成 PS 点的位置对应的 θ_{p1} 和 θ_{p2} 相对较小,并由此形成较窄的 PB 区域宽度。当 $u=3.0$ 时,如图 8(a2)、(b2) 所示,此时偏置电流较

大,两个偏置分量在达到激射状态时输出功率较大,正反向扫描 θ_p 形成 PS 点的位置处的 θ_{p1} 和 θ_{p2} 都有所增大。这是由于 VCSEL 在较大偏置电流条件下,处于激射状态的 y -PC 强度较大,而被抑制的 x -PC 要在较大的注入条件下才可产生 PS。在 P_{inj} 一定时,偏振角度 θ_p 越大,分解到 x -PC 的注入光强就越大,故 PS 点出现在较大的 θ_p 位置。当 $u=4.0$ 时,由图 8(a3)、(b3) 可知,此时更大的偏置电流会导致形成 PS 点的位置处的 θ_{p1} 和 θ_{p2} 进一步变大,但严格来说,该情况是不完全的 PS,因为在正向 PS 点出现之前,被抑制的 x -PC 就已经达到了较大的输出功率,而 y -PC 还处于激射状态,只是在 PS 出现时,两者的输出状态出现跳变,在本文中,为便于归纳分析,仍将此类情况作为 PS 来研究。

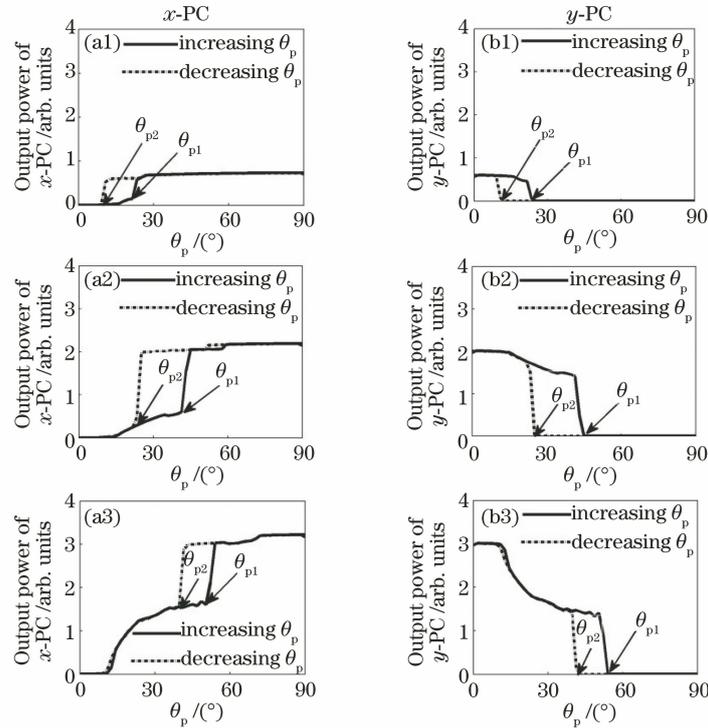


图 8 当 $T=1000$ ns、 $\Delta\nu=-8$ GHz 且 $P_{inj}=0.01$ 时,不同偏置电流 u 情况下 VCSEL 中 x -PC 和 y -PC 的输出功率随 θ_p 的变化曲线。(a1)(b1) $u=1.6$; (a2)(b2) $u=3.0$; (a3)(b3) $u=4.0$

Fig. 8 Output power of x -PC and y -PC of VCSEL as a function of θ_p for different u when $T=1000$ ns, $\Delta\nu=-8$ GHz, and $P_{inj}=0.01$. (a1)(b1) $u=1.6$; (a2)(b2) $u=3.0$; (a3)(b3) $u=4.0$

图 9 给出了 $P_{inj}=0.01$ 、 $\Delta\nu=-8$ GHz 时,正反向扫描 θ_p 过程中,VCSEL 两个偏振分量的 PS 位置及 PB 宽度随偏置电流 u 的变化关系。由图 9(a)可知,当 $T=1000$ ns 时,在考察的偏置电流范围 ($1.6 \leq u \leq 4.0$) 内,不同偏置电流情况下正向扫描和反向扫描 θ_p 均可产生 PS,其所对应的 θ_{p1} 和 θ_{p2} 随着 u 的增大整体均呈现逐渐上升的趋势。图 9(b)给出了与图 9(a)相同条件下,PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 随 u 的变化趋势。可以看出,随着 u 的增大, $\Delta\theta_{p12}$ 整体呈现出较为复杂的变化趋势。当偏置电流较小

($1.6 \leq u \leq 2.0$) 时, $\Delta\theta_{p12}$ 随着 u 的增加而缓慢减小;当偏置电流相对较大($2.0 < u \leq 4.0$) 时, $\Delta\theta_{p12}$ 随着 u 的增加呈现出连续起伏的变化趋势。图 9(c)给出 $T=100$ ns、 $T=1000$ ns 和 $T=10000$ ns 条件下,PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 随 u 的变化曲线。由图 9(c)可以看出,对于偏置电流较小的情况 ($1.6 \leq u \leq 2.0$),不同 T 时 $\Delta\theta_{p12}$ 的差异较小,这主要源于激光器输出功率较低,正反向扫描 θ_p 产生的迟滞效应较弱,扫描周期 T 的变化对 $\Delta\theta_{p12}$ 的影响不大;而对于偏置电流较大 ($2.0 < u \leq 4.0$) 的情况,扫描周期 T

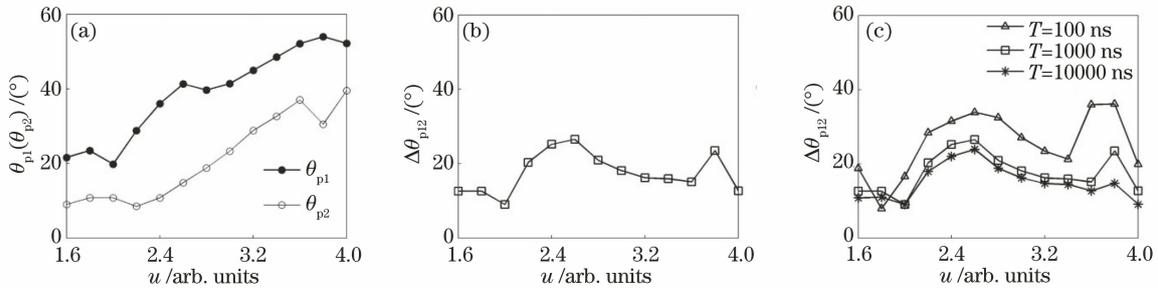


图 9 当 $P_{inj}=0.01$ 、 $\Delta\nu=-8$ GHz 时, θ_{p1} 、 θ_{p2} 和 $\Delta\theta_{p12}$ 随 u 的变化曲线。(a) $T=1000$ ns, θ_{p1} 和 θ_{p2} 随 u 的变化曲线; (b) $T=1000$ ns, $\Delta\theta_{p12}$ 随 u 的变化曲线; (c) 不同 T 时, $\Delta\theta_{p12}$ 随 u 的变化曲线

Fig. 9 Variations of θ_{p1} , θ_{p2} , and $\Delta\theta_{p12}$ with u when $P_{inj}=0.01$ and $\Delta\nu=-8$ GHz. (a) Variations of θ_{p1} and θ_{p2} with u when $T=1000$ ns; (b) variation of $\Delta\theta_{p12}$ with u when $T=1000$ ns; (c) variation of $\Delta\theta_{p12}$ with u for different T

越大,一定偏置电流所对应的 $\Delta\theta_{p12}$ 越小,且 $\Delta\theta_{p12}$ 增加对较大的 T 不敏感。

3.4 γ_s 对时变扫描 θ_p 产生的 PS 和 PB 的影响

对于 VCSEL 而言,内部参数变化均可能改变其输出的动力学状态,从而影响两个正交偏振模式的 PS 和 PB 的特性。在本文中,VCSEL 的中心波长为 1543 nm,给定的线性二向色性系数 γ_a 和双折射系数 γ_p 已限定 x -PC 和 y -PC 的频率和频率间隔 [$\nu_x = (-\gamma_p + \alpha\gamma_a)/(2\pi)$ 和 $\nu_y = (\gamma_p - \alpha\gamma_a)/(2\pi)$, $\Delta\nu_{xy} = \nu_y - \nu_x$]。为简便起见,这里主要分析自旋反转速率 γ_s 变化对扫描 θ_p 产生 PS 和 PB 的影响。图 10 给出了扫描周期 T 、频率失谐 $\Delta\nu$,以及注入强度 P_{inj} 一定时,不同自旋反转速率 γ_s 情况下,

VCSEL 中两个正交偏振分量的输出功率随 θ_p 的变化曲线。图 10(a1)、(b1),图 10(a2)、(b2)和图 10(a3)、(b3) 分别对应于 $\gamma_s = 500 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 1500 \text{ ns}^{-1}$ 3 种不同的情况。从图 10 可以看出,当连续扫描 θ_p 时,不同的 γ_s 条件下均可实现 PS 效应,且正向扫描 θ_p 所形成的 PS 位置的 θ_{p1} 近似相同,但反向扫描 θ_p 所形成的 PS 位置的 θ_{p2} 存在差异。通过比较可知, γ_s 越小,产生反向 PS 所需的 θ_{p2} 也越小,由此得到较大的 PB 区域宽度。这说明对于扫描注入光 θ_p 所产生的 PS 和 PB 效应,自旋反转速率越低,VCSEL 偏振分量输出功率的迟滞效应越显著。

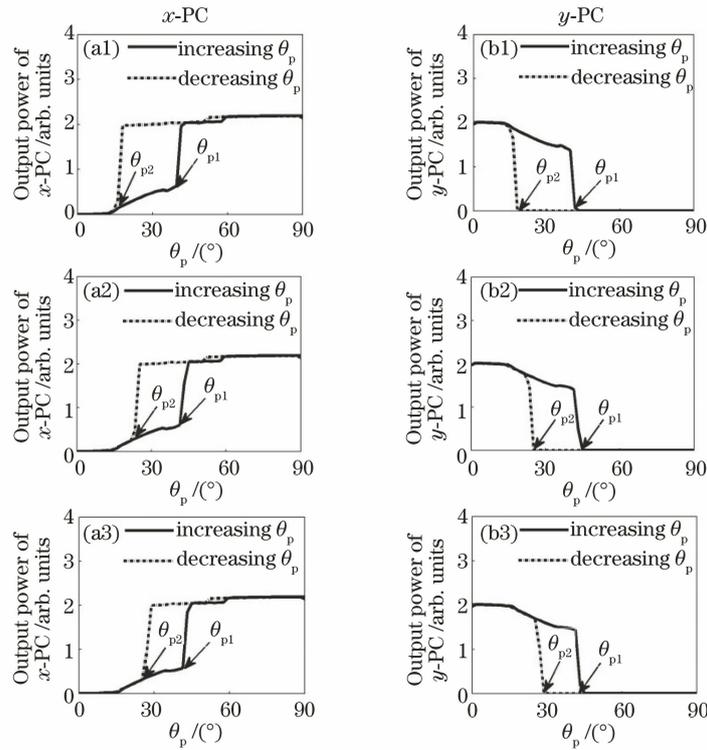


图 10 当 $T=1000 \text{ ns}$ 、 $\Delta\nu=-8 \text{ GHz}$ 且 $P_{inj}=0.01$ 时,不同自旋反转速率 γ_s 情况下 VCSEL 中 x -PC 和 y -PC 的输出功率随 θ_p 的变化曲线。(a1)(b1) $\gamma_s=500 \text{ ns}^{-1}$; (a2)(b2) $\gamma_s=1000 \text{ ns}^{-1}$; (a3)(b3) $\gamma_s=1500 \text{ ns}^{-1}$

Fig. 10 Output power of x -PC and y -PC of VCSEL as a function of θ_p for different γ_s when $T=1000 \text{ ns}$, $\Delta\nu=-8 \text{ GHz}$, and $P_{inj}=0.01$. (a1)(b1) $\gamma_s=500 \text{ ns}^{-1}$; (a2)(b2) $\gamma_s=1000 \text{ ns}^{-1}$; (a3)(b3) $\gamma_s=1500 \text{ ns}^{-1}$

图 11 给出了 $P_{inj}=0.01$ 、 $\Delta\nu=-8 \text{ GHz}$ 时,正反向扫描 θ_p 过程中,VCSEL 两个偏振分量 PS 位置及 PB 宽度随自旋反转速率 γ_s 的变化。由图 11(a) 可知,当 $T=1000 \text{ ns}$ 时,在考察的自旋反转速率 γ_s 范围($500 \text{ ns}^{-1} \leq \gamma_s \leq 1500 \text{ ns}^{-1}$)内,随着 γ_s 的增大,正向扫描 θ_p 产生的 PS 位置处的 θ_{p1} 无明显变化,但反向扫描 θ_p 产生的 PS 位置处的 θ_{p2} 呈现缓慢增加的趋势。图 11(b) 给出了与图 11(a) 相同条

件下,PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 随 γ_s 的变化趋势。由图中可以看出,随着 γ_s 的增大, $\Delta\theta_{p12}$ 呈现缓慢减小的变化趋势。图 11(c) 则给出 $T=100 \text{ ns}$ 、 $T=1000 \text{ ns}$ 和 $T=10000 \text{ ns}$ 条件下,PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 随 γ_s 的变化曲线。当扫描时间 T 较小($T=100 \text{ ns}$)时,随着 γ_s 的增加, $\Delta\theta_{p12}$ 先经历快速下降的过程,接着呈现缓慢减小的趋势并伴随着轻微波动;扫描周期 T 较大($T=1000 \text{ ns}$ 和 $T=10000 \text{ ns}$)时, $\Delta\theta_{p12}$ 随 γ_s

的增加均表现出缓慢减小的趋势,这表明当扫描时间达到一定数值后,VCSEL 输出偏振分量的延迟效

应在减弱,同时 γ_s 的变化对 PB 区域宽度 $\Delta\theta_{p12}$ 的影响也在逐渐减小。

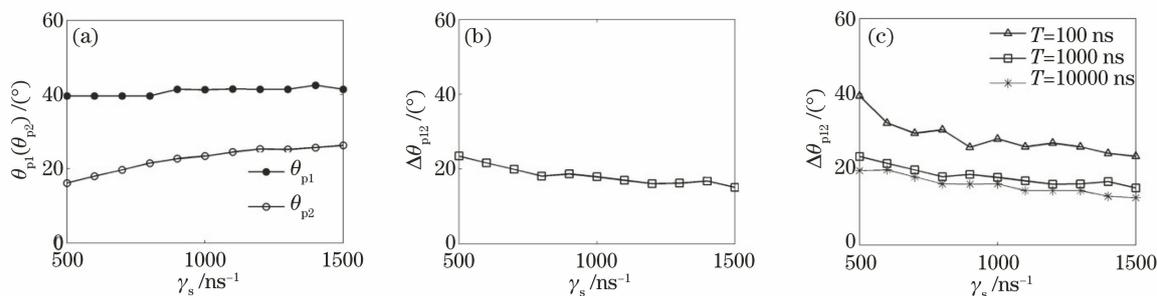


图 11 当 $P_{inj} = 0.01$ 、 $\Delta\nu = -8$ GHz 时, θ_{p1} 、 θ_{p2} 和 $\Delta\theta_{p12}$ 随 γ_s 的变化曲线。(a) $T=1000$ ns 时, θ_{p1} 和 θ_{p2} 随 γ_s 的变化曲线; (b) $T=1000$ ns 时, $\Delta\theta_{p12}$ 随 γ_s 的变化曲线; (c) 不同 T 时, $\Delta\theta_{p12}$ 随 γ_s 的变化曲线

Fig. 11 Variations of θ_{p1} , θ_{p2} , and $\Delta\theta_{p12}$ with γ_s when $P_{inj} = 0.01$ and $\Delta\nu = -8$ GHz. (a) Variations of θ_{p1} and θ_{p2} with γ_s when $T=1000$ ns; (b) variation of $\Delta\theta_{p12}$ with γ_s when $T=1000$ ns; (c) variation of $\Delta\theta_{p12}$ with γ_s for different T

考虑到连续可变偏振光注入 VCSEL 系统的实际应用,可通过调节扫描时间、注入光注入强度、频率失谐、偏置电流,以及系统内部参数来调控 PS 及 PB 的输出特性,以上工作可为基于 VCSEL 系统的光开关、光存储,以及光信号处理等应用领域提供理论参考。

4 结 论

基于可变偏振光注入 VCSELs 的速率方程,数值研究了连续扫描光注入 VCSEL 偏振角产生的 PS 及 PB 的特性。研究表明,连续正向和反向扫描注入光偏振角时,VCSEL 偏振分量所呈现的正反向 PS 特性都与注入光偏振角变化的路径紧密相关,且系统在给定参数条件下, PB 区域的宽度受控于注入光偏振角的扫描周期。当注入光强度一定时,扫描周期及频率失谐的变化均会影响 PS 位置及 PB 宽度,且较小的扫描周期(或较大的扫描速率)和较大的频率失谐有助于增加 PB 的宽度;当频率失谐一定时,较小的注入光强和扫描周期也易于系统产生更宽的 PB。当注入参数一定时, PS 及 PB 特性与 VCSEL 上的偏置电流有关,其 PS 位置及双稳宽度可通过偏置电流及扫描时间进行调控。此外,自旋反转速率参数的变化也会对 VCSEL 偏振分量的输出产生影响,从而改变系统 PS 和 PB 的特性。在实际应用中,可通过连续可变光注入参数及系统参数的合理调节来实现对 VCSEL 的 PS 及 PB 的控制。

参 考 文 献

- [1] Farias B, de Silans T P, Chevrollier M, et al. [2] Zhou Z L, Xia G Q, Deng T, et al. Multiple polarization switching in mutually coupled vertical-cavity surface emitting lasers [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(2): 024208. [3] Islam S M, Banerji P, Banerjee S. Electrical bistability, negative differential resistance and carrier transport in flexible organic memory device based on polymer bilayer structure [J]. Organic Electronics, 2014, 15(1): 144-149. [4] Sessoli R, Gatteschi D, Caneschi A, et al. Magnetic bistability in a metal-ion cluster [J]. Nature, 1993, 365(6442): 141-143. [5] Cruz-Ramírez A, Díaz-Triviño S, Blilou I, et al. A bistable circuit involving SCARECROW-RETINOBLASTOMA integrates cues to inform asymmetric stem cell division [J]. Cell, 2012, 150(5): 1002-1015. [6] Pisarchik A N, Feudel U. Control of multistability [J]. Physics Reports, 2014, 540(4): 167-218. [7] Hayashi D, Nakao K, Katayama T, et al. All-optical 2-bit header recognition and packet switching using polarization bistable VCSELs [J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8357-8364. [8] Zhong D Z, Yang G Z, Zeng N, et al. Optical chaotic flip-flop operations with multiple triggering under clock synchronization in the VCSEL with polarization-preserved optical injection [J]. Optics Express, 2020, 28(7): 10363-10377. [9] Tong H X, Tong C Z, Wang Z Y, et al. Advances in

Frequency bistability of a semiconductor laser under a frequency-dependent feedback [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(17): 173902.

周桢力, 夏光琼, 邓涛, 等. 互注入垂直腔表面发射激光器的多次偏振转换特性研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(2): 024208.

Islam S M, Banerji P, Banerjee S. Electrical bistability, negative differential resistance and carrier transport in flexible organic memory device based on polymer bilayer structure [J]. Organic Electronics, 2014, 15(1): 144-149.

[4] Sessoli R, Gatteschi D, Caneschi A, et al. Magnetic bistability in a metal-ion cluster [J]. Nature, 1993, 365(6442): 141-143.

[5] Cruz-Ramírez A, Díaz-Triviño S, Blilou I, et al. A bistable circuit involving SCARECROW-RETINOBLASTOMA integrates cues to inform asymmetric stem cell division [J]. Cell, 2012, 150(5): 1002-1015.

[6] Pisarchik A N, Feudel U. Control of multistability [J]. Physics Reports, 2014, 540(4): 167-218.

[7] Hayashi D, Nakao K, Katayama T, et al. All-optical 2-bit header recognition and packet switching using polarization bistable VCSELs [J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8357-8364.

[8] Zhong D Z, Yang G Z, Zeng N, et al. Optical chaotic flip-flop operations with multiple triggering under clock synchronization in the VCSEL with polarization-preserved optical injection [J]. Optics Express, 2020, 28(7): 10363-10377.

[9] Tong H X, Tong C Z, Wang Z Y, et al. Advances in

- the technology of 850 nm high-speed vertical cavity surface emitting lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201077.
- 佟海霞, 佟存柱, 王子焯, 等. 850 nm 高速垂直腔面发射激光器技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(12): 20201077.
- [10] Xu G L, Da C, Ni Q L, et al. Reconfigurable optoelectronic chaotic logic gates in vertical cavity surface emitting laser with optical feedback [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1206003.
- 许葛亮, 笪诚, 倪乾龙, 等. 光反馈垂直腔面发射激光器的可重构光电混沌逻辑门[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1206003.
- [11] Zhong D Z, Zeng N, Yang H, et al. Precise ranging for the multi regions of two complex-shape targets by using two chaotic polarization components in the optically pumped spin vertical cavity surface emitting laser with optical injection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(7): 074206.
- 钟东洲, 曾能, 杨华, 等. 外部光注入的光泵浦自旋垂直腔表面发射激光器中的两个混沌偏振分量对两个复杂形状目标中的多区域精确测距[J]. *物理学报*, 2021, 70(7): 074206.
- [12] Fan L, Zheng X M, Xia G Q, et al. Generation of two-channel broadband optical frequency comb using gain-switched 850 nm-VCSEL under orthogonal optical injection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701022.
- 樊利, 郑小梅, 夏光琼, 等. 基于正交光注入增益开关 850 nm-VCSEL 获取双路宽带光学频率梳的方案[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701022.
- [13] Wu M, Wang L S, Wang Y C, et al. Research on chaos resynchronization time of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210607.
- 吴梅, 王龙生, 王云才, 等. 垂直腔面发射激光器的混沌同步恢复时间研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210607.
- [14] Yan Y Y, Chen Z W, Qiu J, et al. Effect of package on luminescence characteristics of high-power VCSEL with narrow pulse[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0814001.
- 颜颖颖, 陈志文, 邱剑, 等. 封装对大功率 VCSEL 窄脉冲发光特性的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0814001.
- [15] Huang X B, Xia G Q, Wu Z M. Polarization bistability characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers with negative optoelectronic feedback subject to time-varying current [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(5): 3066-3069.
- 黄雪兵, 夏光琼, 吴正茂. 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[J]. *物理学报*, 2010, 59(5): 3066-3069.
- [16] Hong Y, Masoller C, Torre M S, et al. Thermal effects and dynamical hysteresis in the turn-on and turn-off of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3688-3690.
- [17] Xiang S Y, Pan W, Luo B, et al. Influence of variable-polarization optical feedback on polarization switching properties of mutually coupled VCSELs [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1700108.
- [18] Chen J J, Xia G Q, Wu Z M. Power-induced polarization switching and bistability characteristics in 1550-nm VCSELs subjected to orthogonal optical injection [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(2): 024210.
- [19] Salvade M F, Masoller C, Torre M S. Polarization switching and hysteresis in vertical-cavity surface-emitting lasers subject to orthogonal optical injection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, 50(10): 848-853.
- [20] Xu P, Xia G Q, Wu Z M, et al. Circular polarization switching and polarization bistability of optically pumped 1300 nm spin vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401002.
- 徐攀, 夏光琼, 吴正茂, 等. 光抽运下 1300 nm 自旋垂直腔面发射激光器输出激光的圆偏振转换及偏振双稳特性[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0401002.
- [21] Quirce A, Pérez P, Lin H, et al. Polarization switching regions of optically injected long-wavelength VCSELs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, 50(11): 921-928.
- [22] Jiang B, Wu Z M, Deng T, et al. Polarization switching characteristics of 1550-nm vertical-cavity surface-emitting lasers subject to double polarization pulsed injection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(11): 2400707.
- [23] Deng T, Xia G Q, Chen J J, et al. Experimental investigation on nonlinear dynamics of 1550 nm VCSEL simultaneously subject to orthogonal optical injection and negative optoelectronic feedback [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(4): 045402.
- [24] Quirce A, Popp A, Denis-le Coarer F, et al. Analysis of the polarization of single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers subject to parallel optical injection[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(2): 447-455.
- [25] Coarer F D L, Quirce A, Pérez P, et al. Injection locking and polarization switching bistability in a 1550 nm VCSEL subject to parallel optical injection

- [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1800910.
- [26] Wang D, Xia G Q, Hou Y S, et al. Theoretical investigation of state bistability between pure- and mixed-mode states in a 1550-nm VCSEL under parallel optical injection[J]. IEEE Access, 2018, 6: 19791-19797.
- [27] Al-Seyab R, Schires K, Hurtado A, et al. Elliptical injection of a 1550 nm-VCSEL: theory and experiment [C] // ISLC 2012 International Semiconductor Laser Conference, October 7-10, 2012, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012: 90-91.
- [28] Al-Seyab R, Schires K, Hurtado A, et al. Dynamics of VCSELs subject to optical injection of arbitrary polarization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1700512.
- [29] Chen J, Chen J J, Wu Z M, et al. Investigations on the polarization switching and bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under variable-polarization optical injection[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(16): 164204.
陈俊, 陈建军, 吴正茂, 等. 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[J]. 物理学报, 2016, 65(16): 164204.
- [30] Chen J J, Wu Z M, Fan L, et al. Polarization bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser subject to variable polarization optical injection[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1502309.
- [31] Fan X X, Li L F, Chen J J. Frequency-induced polarization bistability in the vertical-cavity surface-emitting laser subject to variable polarization optical injection[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, 30(1): 21-28.
樊孝喜, 李林福, 陈建军. 可变偏振光注入垂直腔面发射激光器的频率诱导偏振双稳[J]. 光电子 • 激光, 2019, 30(1): 21-28.
- [32] Martin-Regalado J, Prati F, Miguel M S, et al. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(5): 765-783.
- [33] Tan X S, Hou Y S, Wu Z M, et al. Parallel information processing by a reservoir computing system based on a VCSEL subject to double optical feedback and optical injection[J]. Optics Express, 2019, 27(18): 26070-26079.