

# 光电反馈 1550 nm 垂直腔表面发射 激光器偏振双稳特性

黄守文 陈建军 夏光琼\* 杨欣 吴正茂

西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715

**摘要** 研究了光电反馈对 1550 nm 垂直腔表面发射激光器(1550 nm-VCSEL)中偏置电流沿不同路径连续变化而导致的偏振双稳特性的影响。研究表明:自由运行 1550 nm-VCSEL 的偏置电流在逐渐增加的过程中会产生 I 类偏振开关(PS),而在电流逐渐减小的过程中会产生 II 类 PS, I 类 PS 和 II 类 PS 的开关点电流具有不同的值,即自由运行 1550 nm-VCSEL 呈现出偏振双稳(PB)特性;引入光电正反馈后, I 类 PS 和 II 类 PS 的开关点电流在不同的反馈强度下会有所改变,双稳环宽度随反馈强度的增加呈现逐渐减小的趋势;引入光电负反馈后, I 类 PS 和 II 类 PS 的开关点电流随着反馈强度的增加变化比较复杂,双稳环宽度总体呈现下降的趋势,但下降过程中伴随着较大波动。

**关键词** 激光光学; 偏振双稳; 光电反馈; 垂直腔表面发射激光器; 偏振开关

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.071405

## Polarization Bistability Characteristics of 1550 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Under Optoelectronic Feedback

Huang Shouwen Chen Jianjun Xia Guangqiong Yang Xin Wu Zhengmao

*School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China*

**Abstract** The influences of optoelectronic feedback on the polarization bistability in a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser (1550 nm-VCSEL) resulting from continuously varying the bias currents along different paths are investigated experimentally. The results show that, type I polarization switching (PS) can be generated in a free-running 1550 nm-VCSEL through gradually increasing the bias current, while type II PS emerges during the process of gradually decreasing the bias current. The bias currents of type I PS and type II PS point possess different value, i. e. polarization bistability (PB) appears in the free-running 1550 nm-VCSEL. After introducing positive optoelectronic feedback, the bias currents of type I PS and type II PS points are accordingly varied for different feedback strengths, and the width of the bistability loop shows a gradually decreasing trend with the increase of the feedback strength. After introducing negative optoelectronic feedback, the variations of the currents of type I PS and type II PS points are more complex with the increase of feedback strength, and the width of the bistability loop shows a generally decreasing trend with obvious fluctuation.

**Key words** laser optics; polarization bistability; optoelectronic feedback; vertical-cavity surface-emitting lasers; polarization switching

**OCIS codes** 140.7260; 140.5960; 190.1450

收稿日期: 2016-03-02; 收到修改稿日期: 2016-03-23; 网络出版日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(61275116, 61475127, 61575163)

作者简介: 黄守文(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器偏振双稳特性方面的研究。

E-mail: 849909002@qq.com

导师简介: 吴正茂(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体激光非线性动力学及相关应用等方面的研究。

E-mail: zmwu@swu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: gqxia@swu.edu.cn

## 1 引言

随着半导体激光技术的不断发展,垂直腔表面发射激光器(VCSELs)的制作工艺日趋完善,性能稳定的 VCSELs 因其具有独特的性能在光信息处理与全光通信领域的应用前景日益广阔,市场价值与日俱增<sup>[1-8]</sup>。相比于传统的边发射半导体激光器(EELs),VCSELs 的阈值电流更低、输出功率更有效、线宽更窄、二维阵列集成密度更高以及器件制造成本更加低廉。不同于 EELs,圆形对称结构的有源区以及弱各向异性的增益材料导致 VCSELs 基横模的偏振稳定性较差<sup>[1,9]</sup>。VCSELs 输出的光通常集中于其中的某一特定偏振方向,但当温度、电流等条件变化时,其偏振方向有可能转换为与其正交的偏振方向,即出现偏振开关(PS)<sup>[10-13]</sup>。大量的研究还表明,VCSELs 在引入光反馈、光注入、光电反馈等外部扰动时也会出现 PS 现象,且当系统参量(如温度、电流、注入强度、频率失谐、反馈强度等)沿不同路径变化时,系统在同样的参量数值下的两个正交的偏振分量输出的能量可能不相同,从而出现偏振双稳(PB)现象<sup>[14-21]</sup>。

VCSELs 中呈现的 PB 现象由于在光学逻辑开关、光存储和全光信号整形等领域具有极大的应用前景,已受到相关学者和业界的关注<sup>[22-24]</sup>。然而,在并行光互连以及高速光通信领域,这种因外部扰动或者不同的参量变化路径所导致 VCSELs 呈现的 PS 或 PB 现象,将使其信号输出变得不稳定,从而影响整个系统的性能<sup>[12-21,25-26]</sup>。因此,需要根据实际应用的需求对 VCSELs 呈现的 PS 及 PB 进行利用或抑制。当前已有的相关研究主要集中在光反馈、光注入 VCSELs 中呈现的 PS 及 PB 特性<sup>[16-21]</sup>。如 Hurtado 等<sup>[18-19]</sup>实验研究了正交光注入 VCSELs 在注入功率和注入光波长沿不同路径变化时所产生的 PB 现象,并给出了 PB 宽度与注入功率与注入光波长之间的对应关系;Salvide 等<sup>[20]</sup>理论研究了正交光注入 VCSELs 的 PB 特性,结果显示合适的注入条件可以有效抑制 PB 现象;Hong 等<sup>[21]</sup>从实验和理论上研究了外光反馈对 VCSELs 的 PS 及 PB 特性的影响,结果表明较强的光反馈对 PB 具有抑制作用。

除光反馈和光注入外,另一种常见的外部扰动方式为光电反馈。相对于光反馈和光注入,光电反馈对光场相位变化不敏感,电控操作灵活方便,故受到格外关注<sup>[27-30]</sup>。光电反馈扰动的本质是非规则电流扰动,可诱发产生光开关及复杂的非线性动力学态<sup>[27,31-33]</sup>。因此,VCSELs 中由于偏置电流沿不同路径变化时产生 PS 和 PB 特性在引入光电反馈后势必也会产生变化。本文通过实验研究引入正(或负)光电反馈后 VCSEL 中电流连续变化引起的 PS 及 PB 特性,讨论反馈强度对 VCSEL 中 PS 的开关点电流大小及 PB 宽度的影响。

## 2 实验装置

图 1 为光电正反馈 1550 nm-VCSEL 偏振双稳特性实验装置图。图中实线表示光路,虚线代表电路,反相器去掉时则对应光电负反馈的情形。实验采用的 1550 nm 垂直腔表面发射激光器(1550 nm-VCSEL, RayCan)在一台高精度、低噪声的激光器驱动源(ILX-Lightwave LDC-3724B)的控制下运行,其工作温度稳定在 20.25 °C。激光器的输出经光隔离器(ISO,隔离度大于 55 dB)后被光纤耦合器(FC1,分光比为 20:80)分成 2 部分,其中 20%用于实验探测,而 80%的能量经过可调衰减器(VA)后再被光纤耦合器(FC2,分光比为 10:90)分成 2 部分,其中 10%进入功率计(PM)以监控反馈强度的大小,而 90%通过带宽为 12 GHz 光电探测器(PD, New Focus

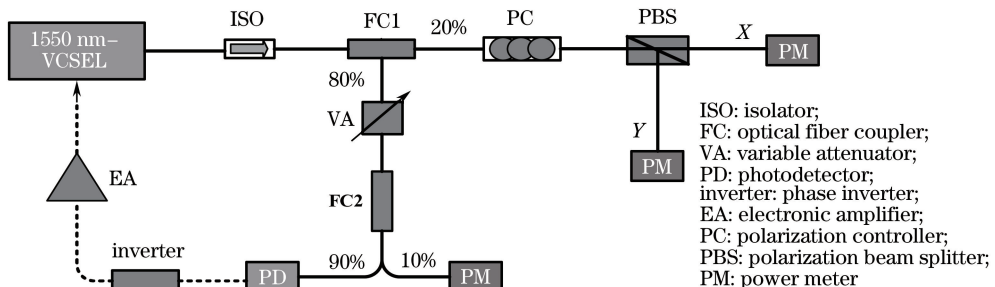


图 1 光电正反馈偏振双稳特性实验装置图(图中实线表示光路,虚线代表电路,反相器去掉时则对应光电负反馈的情形)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system for investigating the polarization bistability subject to positive optoelectronic feedback(The solid line represents the optical path, and the dashed line represents the circuit. When the inverter is removed, the configuration for positive optoelectronic feedback is transformed into that for negative optoelectronic feedback)

1544-B)转成电信号后再经过反相器、电放大器(EA, Agilent 83006A)反馈回激光器中形成光电正反馈。需要说明的是,由于实验中所采用的PD是具有负增益的,因此图中有反相器时为光电正反馈,去掉反相器则为光电负反馈。从FC1输出的用于探测的20%部分经过偏振控制器(PC)和偏振分束器(PBS)后分别对1550 nm-VCSEL输出中的X偏振分量和Y偏振分量的功率进行探测。

### 3 实验结果与讨论

图2(a)给出了自由运行1550 nm-VCSEL在偏置电流 $I=2.6$  mA时的光谱。此时,激光器输出的2个偏振分量波长相差0.234 nm(约29.3 GHz),其中激射波长较短的为Y偏振模式,较长的为X偏振模式。图2(b)为实验测得的1550 nm-VCSEL自由运行的输出功率随电流逐渐增加(实线)以及逐渐减小(虚线)的变化曲线,图中黑色曲线对应X模式、绿色曲线对应Y模式。由图可知,激光器的阈值电流 $I_{th}=1.65$  mA,增大激光器的偏置电流,激射波长较短的Y模式首先发生振荡,而激射波长较长的X模式被抑制。当电流 $I$ 增加到6.87 mA时,X模式将取代Y模式成为主导模式,而Y模式被抑制,即发生I类偏振开关(PS)。电流从6.87 mA增加到8 mA,X偏振分量始终占主导。电流增加到8 mA后,逐渐减小电流,当电流减小到6.42 mA时,发生偏振开关,Y模式取代X模式成为主导模式,而X偏振分量被完全抑制,即发生II类偏振开关<sup>[34]</sup>。因此当电流处于6.42~6.87 mA范围内时,该激光器呈现双稳特性。

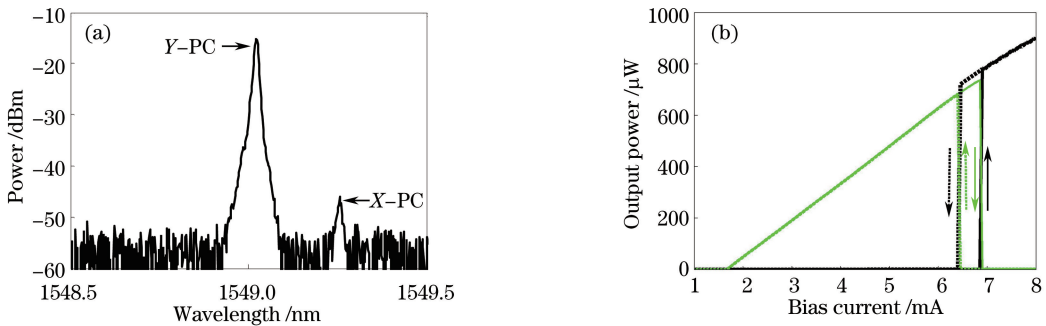


图2 (a) 自由运行1550 nm-VCSEL在 $I=2.6$  mA时输出的光谱及(b)实测自由运行1550 nm-VCSEL输出的偏振分辨 $P-I$ 曲线。其中黑色实(虚)线和绿色实(虚)线分别对应X偏振模和Y偏振模的输出强度随偏置电流递增(递减)时的 $P-I$ 曲线

Fig. 2 (a) Optical spectrum of a free-running 1550 nm-VCSEL biased at 2.6 mA and (b) polarization-resolved  $P-I$  curve of the free-running 1550 nm-VCSEL, where the black solid (dashed) line and green solid (dashed) line correspond to X-polarized light and Y-polarized light with increasing (decreasing) bias current, respectively

#### 3.1 光电正反馈

讨论了引入光电正反馈对1550 nm-VCSEL偏振双稳特性的影响。图3给出了反馈强度 $k_f$ 取不同值时光电正反馈1550 nm-VCSEL输出的偏振分辨 $P-I$ 曲线。黑色实(虚)线和绿色实(虚)线分别对应X偏振模和Y偏振模的输出强度随偏置电流递增(递减)时的 $P-I$ 曲线。 $k_f$ 定义为反馈环路中注入到PD的光功率(通过FC2的10%端进行监测)与自由运行1550 nm-VCSEL输出功率的比值<sup>[27,33]</sup>。如图3(a)所示,当 $k_f=0$ ,偏置电流为6.42~6.87 mA时,1550 nm-VCSEL呈现偏振双稳特性。当 $k_f=0.17$ 时,双稳环宽度略微有所降低,如图3(b)所示。 $k_f$ 增加到0.25,当电流增加时,在 $I=6.67$  mA处出现偏振开关;而当电流递减时,X模和Y模在 $I=6.47$  mA处发生偏振开关,双稳环宽度明显减小,如图3(c)所示。继续增加 $k_f$ 到0.42,当电流递增时,X模和Y模分别在电流为6.12 mA处出现偏振开关;而当电流递减时,X模和Y模在电流为6.07 mA处发生偏振开关,其双稳环宽度已经非常小,如图3(d)所示。

从图3可以看出,在不同的反馈强度下,电流增加过程中发生的I类偏振开关以及电流减小过程中发生的II类偏振开关所对应的开关点电流是不一样的。图4给出了发生I类偏振开关(实线)和II类偏振开关(虚线)的开关点电流随反馈强度的变化曲线。在反馈强度相对较小时,I类偏振开关和II类偏振开关的转换点都几乎保持与自由运行时相同的值;但对于 $0.17 < k_f < 0.25$ 时,随着反馈强度的增加,I类偏振开关的开关点电流表现为快速下降,而II类偏振开关点电流呈现缓慢上升的趋势; $k_f$ 继续增加,I类偏振开关的开关点和II类偏振开关的开关

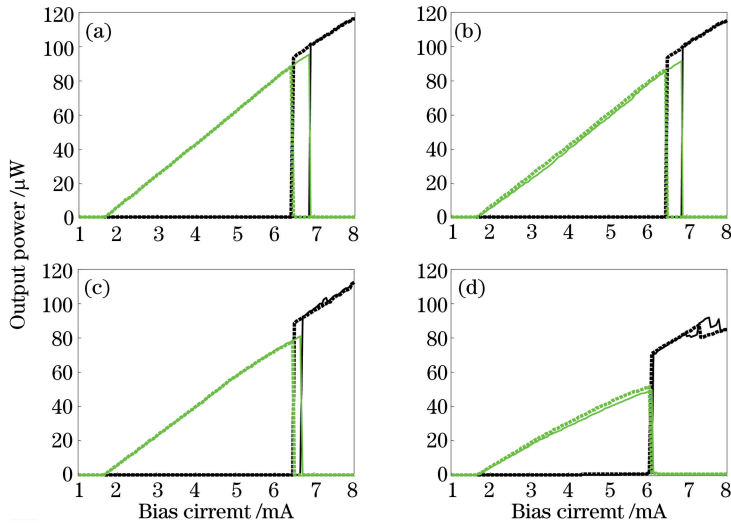


图3 不同反馈强度下光电正反馈 1550 nm-VCSEL 输出的偏振分辨  $P-I$  曲线, 其中黑色实(虚)线和绿色实(虚)线分别对应 X 偏振模和 Y 偏振模的输出强度随偏置电流递增(递减)时的  $P-I$  曲线。(a)  $k_f=0$ ; (b)  $k_f=0.17$ ; (c)  $k_f=0.25$ ; (d)  $k_f=0.42$

Fig. 3 Polarization-resolved  $P-I$  curves of the 1550 nm-VCSEL subject to positive optoelectronic feedback with different feedback strengths, where the black solid (dashed) line and green solid (dashed) line correspond to X-polarized light and Y-polarized light with increasing (decreasing) bias current, respectively. (a)  $k_f=0$ ; (b)  $k_f=0.17$ ; (c)  $k_f=0.25$ ; (d)  $k_f=0.42$

点电流均呈现下降的趋势,且两者之间的差异逐渐减小。这两类偏振开关的开关点电流随反馈强度的变化趋势导致双稳环宽度随反馈强度存在如图5所示的变化关系。在反馈强度较小时( $0 < k_f < 0.17$ ),双稳环宽度几乎保持不变,即较小的光电反馈强度不影响双稳环宽度;继续增加反馈强度,且当  $0.17 < k_f < 0.25$  时,双稳环宽度会随着反馈强度的增大呈现快速下降的趋势。继续增加反馈强度,双稳环宽度总体呈现下降的趋势。

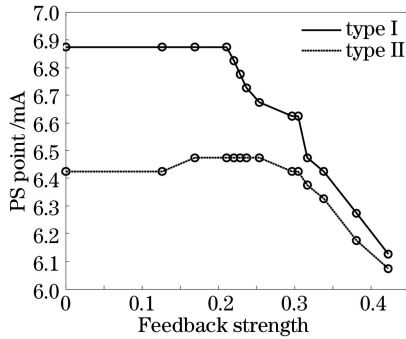


图4 光电正反馈中开关点电流随反馈强度的变化

Fig. 4 Variation of the PS point currents with feedback strength subject to positive optoelectronic feedback

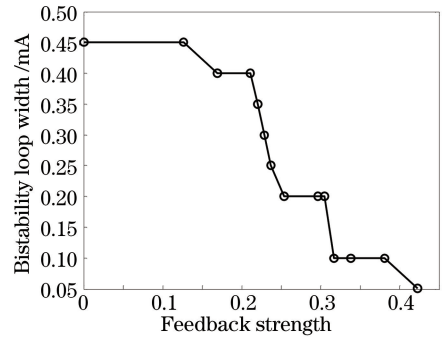


图5 光电正反馈 1550 nm-VCSEL 的偏振双稳环宽度随反馈强度的变化

Fig. 5 Variation of polarization bistability loop width of 1550 nm-VCSEL subject to positive optoelectronic feedback with the feedback strength

### 3.2 光电负反馈

图6给出了不同反馈强度  $k_f$  下光电负反馈 1550 nm-VCSEL 输出的偏振分辨  $P-I$  曲线。黑色实(虚)线和绿色实(虚)线分别对应 X 偏振模和 Y 偏振模的输出强度随偏置电流递增(递减)时的  $P-I$  曲线。图6(a)为  $k_f=0.13$  的情形,1550 nm-VCSEL 在偏置电流为 6.42~6.82 mA 时呈现偏振双稳特性。当  $k_f=0.23$  时,当电流递增时,X 模和 Y 模在  $I=6.72$  mA 处发生I类偏振开关;而当电流递减时,在  $I=6.52$  mA 处出现II类偏振开关,此状态下双稳环宽度明显减小,如图6(b)所示。继续增加  $k_f$  到 0.34,会发现与  $k_f=0.23$  时相比,双稳环宽度又会变宽,如图6(c)所示。当  $k_f$  增加到 0.42 时,其双稳环宽度基本消失,如图6(d)所示。值得注意的是:  $k_f$  较大时,偏振转换不是突然发生的,在发生偏振转换的电流附近,两偏振分量具有近似相当的输出功率,这与光电正反馈时所得的结果不同,如图6(c)和图6(d)所示。



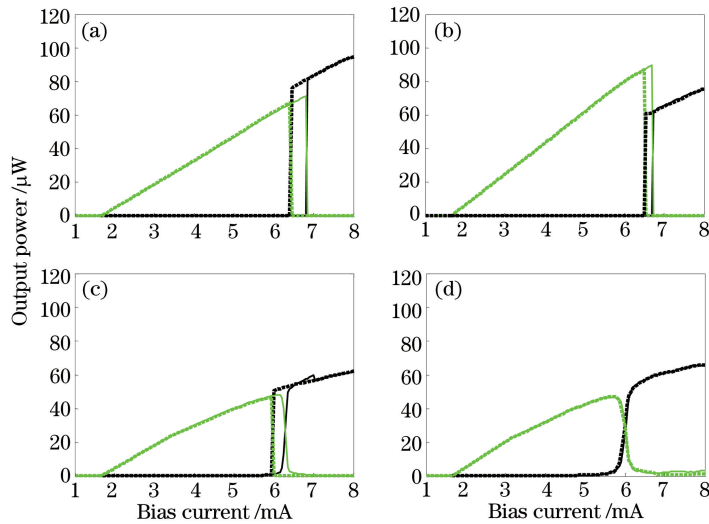


图 6 不同反馈强度下光电负反馈 1550 nm-VCSEL 输出的偏振分辨  $P-I$  曲线,其中黑色实(虚)线和绿色实(虚)线分别对应 X 偏振模和 Y 偏振模的输出强度随偏置电流递增(递减)时的  $P-I$  曲线。(a)  $k_f=0.13$ ; (b)  $k_f=0.23$ ; (c)  $k_f=0.34$ ; (d)  $k_f=0.42$

Fig. 6 Polarization-resolved  $P-I$  curves of the 1550 nm-VCSEL subject to negative optoelectronic feedback with different feedback strengths, where the black solid (dashed) line and green solid (dashed) line correspond to X-polarized light and Y-polarized light with increasing (decreasing) bias current, respectively. (a)  $k_f=0.13$ ; (b)  $k_f=0.23$ ; (c)  $k_f=0.34$ ; (d)  $k_f=0.42$

由图 6 可知,在不同的反馈强度下,电流递增过程中发生的 I 类偏振开关和电流递减过程中发生的 II 类偏振开关所对应的开关点电流是不相同的。图 7 给出了发生 I 类偏振开关(实线)和 II 类偏振开关(虚线)的开关点电流随反馈强度的变化曲线。当反馈强度相对较小时, I 类偏振开关的开关点基本保持不变;当  $0.21 < k_f < 0.25$  时, I 类偏振开关的开关点电流随着  $k_f$  的增加而迅速减小;在  $0.25 < k_f < 0.51$  时, I 类偏振开关点电流先是在 6.2 mA 附近有一段波动,之后随着  $k_f$  的增大而逐渐减小。II 类偏振开关点在反馈强度较小时保持不变;增大  $k_f$  ( $0.17 < k_f < 0.23$ ), II 类偏振开关点电流有增大趋势;继续增大  $k_f$  ( $0.23 < k_f < 0.34$ ), II 类偏振开关点电流逐渐减小;进一步增大  $k_f$ , 在  $0.34 < k_f < 0.51$  时, II 类偏振开关点电流出现一定的起伏后逐渐减小。两类偏振开关的开关点电流随  $k_f$  的变化趋势,导致了双稳环宽度随  $k_f$  存在如图 8 所示的变化关系。当  $k_f$  较小时( $k_f < 0.13$ ), 双稳环宽度保持不变;  $k_f$  从 0.13 增大到 0.25 的过程中, 双稳环宽度出现一个小的起伏后逐渐减小;继续增大  $k_f$  ( $0.25 < k_f < 0.34$ ), 双稳环宽度呈明显的增大趋势;进一步增大  $k_f$  ( $0.34 < k_f < 0.51$ ), 双稳环宽度再次减小,直至消失( $k_f=0.42$  时)。

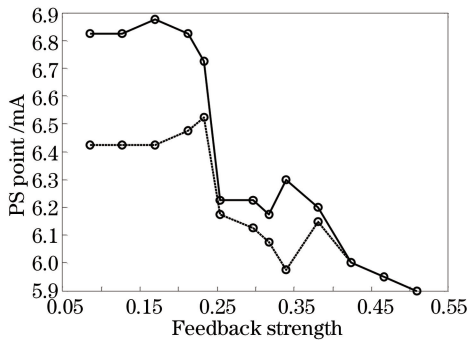


图 7 光电负反馈中开关点电流随反馈强度的变化

Fig. 7 Variation of the PS point current with the feedback strength subject to negative optoelectronic feedback

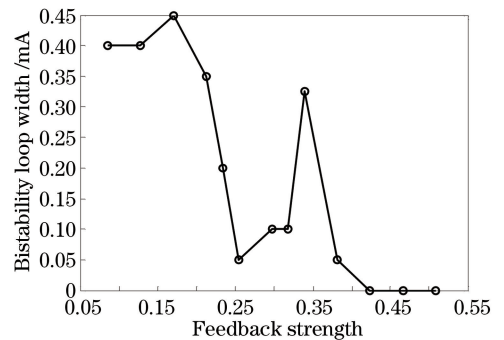


图 8 光电负反馈 1550 nm-VCSEL 的偏振双稳环宽度随反馈强度的变化

Fig. 8 Variation of polarization bistability loop width of 1550 nm-VCSEL subject to negative optoelectronic feedback with feedback strength

对于 1550 nm-VCSEL,正负光电反馈的引入均可有效抑制电流沿不同路径连续变化引起的双稳现象,而且抑制程度与光电反馈强度的大小相关。产生这一现象的原因为:1550 nm-VCSEL 中两个偏振模式所获得的增

益与偏置电流的路径有关, 偏振模式的自增益饱和以及交叉增益饱和导致电流沿不同路径连续扫描时出现了偏振双稳现象<sup>[21]</sup>。当系统引入光电反馈后, 其输出的光信号转换为电流信号后反馈回 1550 nm-VCSEL, 改变了实际加载到 1550 nm-VCSEL 的电流值, 从而导致开关点所需的直流偏置发生变化, 影响 1550 nm-VCSEL 的偏振双稳特性; 光电反馈强度越大, 其影响就越显著。在实验过程中所使用的光电探测器自身具有隔直流的特点, 即正负光电反馈情况下都仅有反馈电流的波动部分才对激光器有影响, 从而导致正、负光电反馈下呈现大体相似的变化趋势。可以预计, 如果光电反馈信号中包含直流部分, 引入正光电反馈与引入负光电反馈的结果将会有差异。

## 4 结 论

研究了引入光电正反馈或光电负反馈后 1550 nm-VCSEL 中由于偏置电流变化导致的偏振开关以及偏振双稳特性。研究结果表明, 无论是引入光电正反馈还是引入光电负反馈, 都将导致激光器的 PS、PB 特性发生变化。在光电正反馈的情况下, I类 PS 和II类 PS 的开关点电流在反馈强度相对较小时几乎不变, 随着反馈强度的增大, 两类 PS 点电流整体呈下降趋势, 且两者之间的差异逐渐减小, 其双稳环宽度逐渐减小; 在光电负反馈的情况下, 两类 PS 点电流随反馈强度的增大总体向更小电流方向移动, 不过变化趋势相对复杂, 从而导致其双稳环宽度总体呈现下降的趋势, 但下降过程中伴随着较大波动。因此, 通过控制光电反馈强度, 可对 1550 nm-VCSEL 输出偏振双稳区的宽度以及偏振开关出现的位置进行合理调控。

## 参 考 文 献

- 1 San M M, Feng Q, Moloney J V. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers[J]. Phys Rev A, 1995, 52(2): 1728-1739.
- 2 Iga K. Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2000, 6(6): 1201-1215.
- 3 Koyama F. Recent advances of VCSEL photonics[J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(12): 4502-4513.
- 4 Li Xiushan, Ning Yongqiang, Cui Jinjiang, *et al.*. Polarization properties of rectangle-shape VCSEL with asymmetrical current injection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 071402.  
李秀山, 宁永强, 崔锦江, 等. 非对称电流注入对矩形台面激光器的偏振分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 071402.
- 5 Li Xiushan, Ning Yongqiang, Jia Peng, *et al.*. Rectangular mesa shaped vertical cavity surface emitting laser with shallow surface relief[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202005.  
李秀山, 宁永强, 贾鹏, 等. 浅面浮雕矩形台面垂直腔面发射半导体激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202005.
- 6 Wang Hongying, Cheng Zhen, Zhao Xiaoxia, *et al.*. Polarization controlling of vertical cavity surface emitting laser with cholesteric liquid crystal overlay[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 111402.  
王红英, 成 桢, 赵小侠, 等. 表面涂覆胆固醇液晶-垂直腔面发射激光器的偏振特性[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 111402.
- 7 Liu Yujin, Zhang Shenghai, Yang Hua, *et al.*. Application in secret communication of chaos driving synchronization of vertical cavity surface emitting lasers with optical feedback[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905004.  
刘玉金, 张胜海, 杨 华, 等. 光反馈垂直腔面发射半导体激光器的混沌驱动同步在保密通信中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905004.
- 8 Li Zhifeng, Wang Hongjie, Wang Wenrui, *et al.*. Upconversion by vertical cavity surface emitting laser injection locking[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206001.  
李知峰, 王红杰, 王文睿, 等. 利用垂直腔表面发射激光器注入锁定实现上变频[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206001.
- 9 Martin-Regalado J, Prati F, San Miguel M, *et al.*. Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 33(5): 765-783.
- 10 Martin-Regalado J, Miguel M S, Abraham N B, *et al.*. Polarization switching in quantum-well vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Opt Lett, 1996, 21(5): 351-353.
- 11 Russell T H, Milster T D. Polarization switching control in vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Appl Phys Lett, 1997, 70(19): 2520-2522.

- 12 Deng T, Wu Z M, Xie Y Y, *et al.*. Impact of optical feedback on current-induced polarization behavior of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(16): 3833-3837.
- 13 Quirce A, Valle A, Pesquera L, *et al.*. Measurement of temperature-dependent polarization parameters in long-wavelength VCSELs[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2015, 21(6): 1800207.
- 14 Masoller C, Torre M S, Mandel P. Influence of the injection current sweep rate on the polarization switching of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(2): 026108.
- 15 Paul J, Masoller C, Mandel P, *et al.*. Experimental and theoretical study of dynamical hysteresis and scaling laws in the polarization switching of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Phys Rev A*, 2008, 77(4): 043803.
- 16 Gatara I, Buesa J, Thienpont H, *et al.*. Polarization switching bistability and dynamics in vertical-cavity surface-emitting laser under orthogonal optical injection[J]. *Opt & Quant Electron*, 2006, 38(4): 429-443.
- 17 Valle A, Gomez-Molina M, Pesquera L. Polarization bistability in 1550 nm wavelength single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers subject to orthogonal optical injection[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2008, 14(3): 895-902.
- 18 Hurtado A, Henning I D, Adams M J. Different forms of wavelength polarization switching and bistability in a 1.55 microm vertical-cavity surface-emitting laser under orthogonally polarized optical injection[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 365-367.
- 19 Hurtado A, Ana Q, Angel V, *et al.*. Power and wavelength polarization bistability with very wide hysteresis cycles in a 1550 nm-VCSEL subject to orthogonal optical injection[J]. *Opt Express*, 2009, 17(26): 23637-23642.
- 20 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 J Quantum Electron*, 2014, 50(10): 848-853.
- 21 Hong Y, Ju R, Spencer P S, *et al.*. Investigation of polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers subjected to optical feedback[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2005, 41(5): 619-624.
- 22 Zamora-Munt J, Masoller C. Numerical implementation of a VCSEL-based stochastic logic gate via polarization bistability[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 16418-16429.
- 23 Kawaguchi H. Optical buffer memory with a shift register function using polarization bistable VCSELs[C]. 9<sup>th</sup> International Conference on Transparent Optical Networks, 2007: 17-20.
- 24 Lee S H, Jung H W. All-optical flip-flop operation based on polarization bistability of conventional-type 1.55- $\mu\text{m}$  wavelength single-mode VCSELs[J]. *Journal of Optical Society of Korea*, 2010, 14(2): 137-141.
- 25 Masoller C, Torre M S. Influence of optical feedback on the polarization switching of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2005, 41(4): 483-489.
- 26 Jeong K H, Kim K H, Lee S H, *et al.*. Optical injection-induced polarization switching dynamics in 1.5- $\mu\text{m}$  wavelength single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(10): 779-781.
- 27 Lin F Y, Liu J M. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, 39(4): 562-568.
- 28 Xia G Q, Chan S C, Liu J M. Multistability in a semiconductor laser with optoelectronic feedback[J]. *Opt Express*, 2007, 15(2): 572-576.
- 29 Liao J F, Sun J Q. Polarization dynamics and chaotic synchronization in unidirectionally coupled VCSELs subjected to optoelectronic feedback[J]. *Opt Commun*, 2013, 295(10): 188-196.
- 30 Hu Hanping, Chen Xiaofeng, Su Wei, *et al.*. Multi-coupled chaos synchronization and communication based on optoelectronic feedback delay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0406006.  
胡汉平, 陈笑风, 苏威, 等. 基于光电反馈延迟的多点耦合混沌同步和通信[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0406006.
- 31 Wang Xiaofa. Polarization switching dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser subject to negative optoelectronic feedback[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 104208.  
王小发. 光电负反馈下垂垂直腔表面发射激光器偏振开关特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(10): 104208.
- 32 Zhang W L, Pan W, Luo B, *et al.*. Theoretical study on polarization dynamics of VCSELs with negative optoelectronic feedback[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(29): 7262-7266.
- 33 Xie Y Y, Wu Z M, Deng T, *et al.*. Nonlinear dynamics of 1550-nm VCSELs subject to positive optoelectronic feedback[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(15): 1605-1608.
- 34 Wang X F, Xia G Q, Wu Z M. Theoretical investigations on the polarization performances of current-modulated VCSELs subject to weak optical feedback[J]. *J Opt Soc Am B*, 2009, 26(1): 160-168.