

引用格式: LI Gui-ying, YANG Wen-yan, WU Zheng-mao, *et al.* Broadband Optical Frequency Comb Generation Based on a Current-modulated 1 550 nm-VCSEL Subject to Optical Injection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1214003
李桂英,杨文艳,吴正茂,等.基于光注入下电流调制 1 550 nm 垂直腔面发射激光器获取宽带光学频率梳[J].光子学报,2019, **48**(12):1214003

基于光注入下电流调制 1 550 nm 垂直腔面发射 激光器获取宽带光学频率梳

李桂英¹,杨文艳^{1,2},吴正茂¹,夏光琼¹

(1 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2 重庆科技学院 数理学院, 重庆 401331)

摘 要:数值研究了一种获取宽带光学频率梳的方案.在该方案中,首先采用调制频率 $f_m = f_0/n$ (f_0 为 1 550 nm 垂直腔面发射激光器中两正交偏振分量频率间隔, n 为整数)的大调制信号电流调制一个 1 550 nm 垂直腔面发射激光器,使该 1 550 nm 垂直腔面发射激光器中的主振荡模式—Y 偏振分量输出光学频率梳,而 X 偏振分量处于被抑制状态;进一步地,引入线偏振光注入,使激光器中两个偏振分量(光谱主峰比小于 15 dB)均实现光学频率梳输出;再借助一个偏振片,将这两个偏振分量引导到该偏振片的透振方向实现光谱拼接,从而获取宽带光学频率梳.基于自旋反转模型,数值研究了由该方案产生的光学频率梳特性.仿真结果表明:在给定的参数条件下,一个自由运行 1 550 nm 垂直腔面发射激光器(阈值电流为 2.6 mA)偏置在 11.5 mA 时,Y 偏振分量占主导而 X 偏振分量被抑制(光谱主峰比大于 30 dB);在受到调制深度较大的电流调制作用下,该激光器只在 Y 偏振分量输出光学频率梳;引入线性偏振光注入后,通过调整线性偏振光的偏振方向,可使 X、Y 偏振分量同时实现光学频率梳输出;最后,利用一偏振片将 X、Y 偏振分量引导到该偏振片的透振方向实现光谱拼接,最终可获得一个带宽超过 80 GHz 的光学频率梳.

关键词:光注入;电流调制;1 550 nm 垂直腔面发射激光器;光学频率梳

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20194812.1214003

Broadband Optical Frequency Comb Generation Based on a Current-modulated 1 550 nm-VCSEL Subject to Optical Injection

LI Gui-ying¹, YANG Wen-yan^{1,2}, WU Zheng-mao¹, XIA Guang-qiong¹

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

(2 School of Mathematics and Physics, Chongqing University of Science and Technology,
Chongqing 401331, China)

Abstract: A scheme for generating broadband optical frequency comb was proposed and numerically simulated. For this scheme, a 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under a large signal current modulation with a modulation frequency of $f_m = f_0/n$ (f_0 is the frequency interval of two orthogonal polarization components of a 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting laser, n is an integer) can output an optical frequency comb in the dominant Y polarization component direction while the X polarization component is suppressed. By further introducing a linearly polarized optical injection, both the two

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61575163, 61775184, 61875167)

第一作者:李桂英(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向为半导体激光非线性动力学. Email:lgy19941221@foxmail.com

导师(通讯作者):夏光琼(1970—),女,教授,博导,主要研究方向为半导体激光非线性动力学及其应用. Email:gqxia@swu.edu.cn

收稿日期:2019-07-09;录用日期:2019-08-28

polarization components (spectral main-peak ratio less than 15 dB) can output optical frequency combs. Finally, via a polarizer the two optical frequency combs with orthogonal polarization components can be decomposed by spectral splicing to obtain a broadband optical frequency comb. Based on the spin-flip model, the optical frequency comb performances of generated by this scheme is numerically investigated. The numerical results demonstrate that, when the bias current of a 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting laser with a threshold current of 2.6 mA is set at 11.5 mA, the Y polarization component dominates while the X polarization component was suppressed, and the ratio of the main spectral peaks of the two polarization components is more than 30 dB. Under a current modulation with a large modulation index, only the Y polarization component of the laser can realize an optical frequency comb output. By further introducing a linearly polarized optical injection, both two polarization components can output optical frequency combs by adjusting the polarization direction of the linearly polarized light. Finally, a polarizer is used to guide the two polarization components to the transparent direction of the polarizer to achieve the spectral splicing, and then an optical frequency comb with a bandwidth more than 80 GHz can be obtained.

Key words: Optical injection; Current modulation; 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers; Optical frequency comb

OCIS Codes: 140.7260; 140.5960; 190.4360; 130.4310

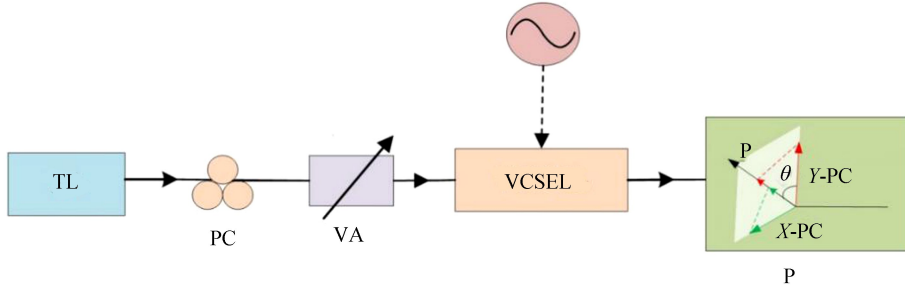
0 引言

光学频率梳(Optical Frequency Comb, OFC)由一系列离散的、等间隔的频率成分组成,能够在一段频内同时提供几个至几十个不同的频率成分,具有谱线数目多、频率范围广、谱线间隔均衡等优点,在光谱学、微波光子学、计量学、光通信、光学任意波形生成等领域具有广泛的应用^[1-5].目前获取 OFC 的常用方法主要有锁模、光电调制和增益开关等方式^[6-10],其中利用增益开关半导体激光器产生 OFC 由于具有结构简单、易于操控、重复频率可调和损耗低的优点而倍受关注^[9-12].

垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs)因具有低阈值电流、制作成本低、易于集成、高光纤耦合效率以及低能耗等特点在众多领域均有应用^[13-21],近年来其在 OFC 产生方面的相关理论和实验研究已取得一些进展^[22-28].例如,PRIOR E 等^[24]实验证明了 VCSEL 在电流调制作用下,两个正交偏振分量可同时产生 OFC,再经过叠加后可以得到宽带 OFC;该小组还进一步研究了光注入锁定对增益开关 VCSEL 产生的两个正交偏振 OFC 的影响,结果表明:在适当的注入参量下,叠加后得到的 OFC 的带宽得到了提升^[25].QUIRCE A 等^[28]基于自旋反转模型(Spin-Flip Model, SFM),理论研究了偏振光注入对增益开关 VCSEL 产生两个偏振分量 OFC 的影响,结果表明:在给定的注入强度下,注入光的线偏角对叠加后 OFC 的带宽有重要的影响,通过优化注入参数,能够提高叠加后 OFC 的带宽.值得关注的一点是:上述报道中尽管通过对光注入增益开关 VCSEL 输出的两个偏振正交 OFC 直接进行叠加可得到一个宽带宽 OFC,但是由于该 OFC 本质上还是来自于两个正交偏振的 OFC,因此显然其在偏振敏感的相关实际应用中存在很大局限性.基于此,本文提出并数值研究了一个基于光注入下电流调制 1 550 nm-VCSEL 获取宽带宽、偏振方向一致的 OFC 方案.本方案首先将线偏振光注入一个电流调制的 1 550 nm-VCSEL,得到两个偏振正交的 OFC;再引入一个偏振片,使这两个偏振正交的 OFC 均分解到该偏振片的透振方向上,通过适当调整偏振片的透振方向,能够获得一个偏振方向一致、带宽增加的 OFC.

1 理论模型

图 1 为本文提出的基于光注入下电流调制 1 550 nm-VCSEL 获取宽带 OFC 的方案示意图.可调谐激光器(Tunable Laser, TL)输出光通过一个偏振控制器(Polarization Controller, PC)(调节注入光的偏振方向)和一个可变衰减器(Variable Attenuator, VA)(控制注入光的强度)注入到电流调制的 1 550 nm-VCSEL 中,在合适的工作参数条件下该激光器可同时输出两个正交偏振的 OFC.再借助于一个偏振片(Polarizer, P),这两个 OFC 可以合成一个偏振方向一致的宽带 OFC.



TL: tunable laser; PC: polarization controller; VA: variable attenuator; VCSEL: vertical-cavity surface-emitting laser; P: polarizer

图 1 光注入下电流调制 1 550 nm-VCSEL 产生宽带 OFC 的方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of a broadband OFC generation based on a current-modulated 1 550 nm-VCSEL under optical injection

基于 SFM^[13],并考虑非线性载流子复合,描述光注入下电流调制 1550 nm-VCSELs 动力学特性的速率方程^[27-28]可表示为

$$\frac{dE_x}{dt} = -(\kappa + \gamma_a)E_x - i(\kappa\alpha + \gamma_p)E_x + \kappa(1 + i\alpha)(DE_x + inE_y) + \kappa E_{inj} \sin \theta_p e^{i2\pi\Delta\nu t} + F_x \quad (1)$$

$$\frac{dE_y}{dt} = -(\kappa - \gamma_a)E_y - i(\kappa\alpha - \gamma_p)E_y + \kappa(1 + i\alpha)(DE_y - inE_x) + \kappa E_{inj} \cos \theta_p e^{i2\pi\Delta\nu t} + F_y \quad (2)$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{I}{e\Delta N_t} - R(D) - \gamma D (|E_x|^2 + |E_y|^2) - i\gamma n (E_y E_x^* - E_x E_y^*) \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma_s n - \gamma n (|E_x|^2 + |E_y|^2) - i\gamma D (E_y E_x^* - E_x E_y^*) \quad (4)$$

式中,下标 x 和 y 分别代表 X 偏振分量(X polarization component, X -PC)和 Y 偏振分量(Y polarization component, Y -PC), E 表示光场的慢变复振幅.归一化总载流子数 $D = (N - N_t)/(N_{th} - N_t)$,其中 N 、 N_t 、 N_{th} 分别表示载流子数、阈值载流子数、透明载流子数. n 表示自旋向上和自旋向下能级对应的载流子数之差. γ_a 为有源介质线性二向色性系数, γ_p 为有源介质双折射速率, γ_a 和 γ_p 分别表征 VCSEL 中增益以及折射率的两向异性. κ 为光场衰减速率, α 为线宽增强因子, γ 为归一化总载流子数衰减速率, G_N 为微分增益, γ_s 为自旋反转速率. E_{inj} 表示注入场振幅, θ_p 为线偏角,表示注入偏振光的振动方向与 1 550 nm-VCSEL 中 Y -PC 方向的夹角.频率失谐 $\Delta\nu = \nu_{inj} - (\nu_x + \nu_y)/2$,其中 ν_{inj} 表示注入光频率, $\nu_x = (\alpha\gamma_a - \gamma_p)/2\pi$ 和 $\nu_y = (\gamma_p - \alpha\gamma_a)/2\pi$ 分别为 X -PC 和 Y -PC 的频率.偏置电流 $I(t) = I_0(1 + m \cos(2\pi f_m t))$,其中 I_0 表示直流偏置电流, m 表示调制深度, f_m 表示调制频率.非线性载流子复合 $R(D) = A(D + D_t) + B(D + D_t)^2 + C(D + D_t)^3$,其中 A 为非辐射系数, B 为辐射系数, C 为俄歇系数, $D_t = N_t/\Delta N_t$, $\Delta N_t = N_{th} - N_t$. F 表示自发辐射噪声,具体形式为^[28]

$$F_x = \sqrt{\frac{1}{2}\beta_{SF}\gamma} \left((D+n) + \frac{G_N N_t}{2\kappa} \right) \xi_+(t) + \sqrt{\frac{1}{2}\beta_{SF}\gamma} \left((D-n) + \frac{G_N N_t}{2\kappa} \right) \xi_-(t) \quad (5)$$

$$F_y = i \left(\sqrt{\frac{1}{2}\beta_{SF}\gamma} \left((D-n) + \frac{G_N N_t}{2\kappa} \right) \xi_-(t) - \sqrt{\frac{1}{2}\beta_{SF}\gamma} \left((D+n) + \frac{G_N N_t}{2\kappa} \right) \xi_+(t) \right) \quad (6)$$

式中, β_{SF} 为自发辐射噪声因子, $\xi_+(t)$ 和 $\xi_-(t)$ 是两个互相独立的高斯白噪声源.光注入下电流调制 1 550 nm-VCSEL 输出的两个正交偏振 OFC 经过偏振片 P 后的电场可表示为

$$E_t = E_x \sin \theta + E_y \cos \theta \quad (7)$$

式中,偏振角 θ 表示偏振片透振方向与 Y -PC 的夹角.

2 结果与分析

上述速率方程可利用四阶龙格-库塔法进行数值求解.计算过程中所用参数如下^[28]: $\kappa = 36 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = 1.4 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 106 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 2.1$, $\beta_{SF} = 5.4 \times 10^{-4}$, $\gamma = 2.8 \text{ ns}^{-1}$, $G_N = 3.37 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, $N_t = 1.49 \times 10^7$, $N_{th} = 1.7 \times 10^7$, $\gamma_s = 1 \text{ 000 ns}^{-1}$, $A = 2.1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $B = 6 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $C = 7 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$.图 2(a)给出了在上述参数下一

个自由运行 1 550 nm-VCSEL 输出的偏振分解 $P-I_0$ 曲线,其中实线和虚线分别代表 Y-PC 和 X-PC.由图可知,激光器的阈值电流为 2.6 mA.当电流超过该阈值电流时,Y-PC 激射.在上面给定的 $\gamma_a = 1.4 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 106 \text{ ns}^{-1}$ 参数取值以及所讨论的电流范围内,X-PC 一直处于被抑制状态(本文假定当两个偏振分量的光谱主峰值之比超过 15 dB 时,强度较弱的偏振分量处于被抑制状态).图 2(b)给出了偏置电流 $I_0 = 11.5 \text{ mA}$ 时,激光器输出的两正交偏振分量的光谱.在模拟过程中,时间步长为 2.5 ps,总时长为 2 μs ,对光谱进行数值仿真时,在后 1 μs 内依次取 20 个时间窗口,每个时间窗口为 40.96 ns,对其取平均电场进行计算.从图中可以看出,两个光谱主峰值之比超过 50 dB,因此 Y-PC 处于激射状态,而 X-PC 被抑制;Y-PC 与 X-PC 的频率间隔为 34.00 GHz.

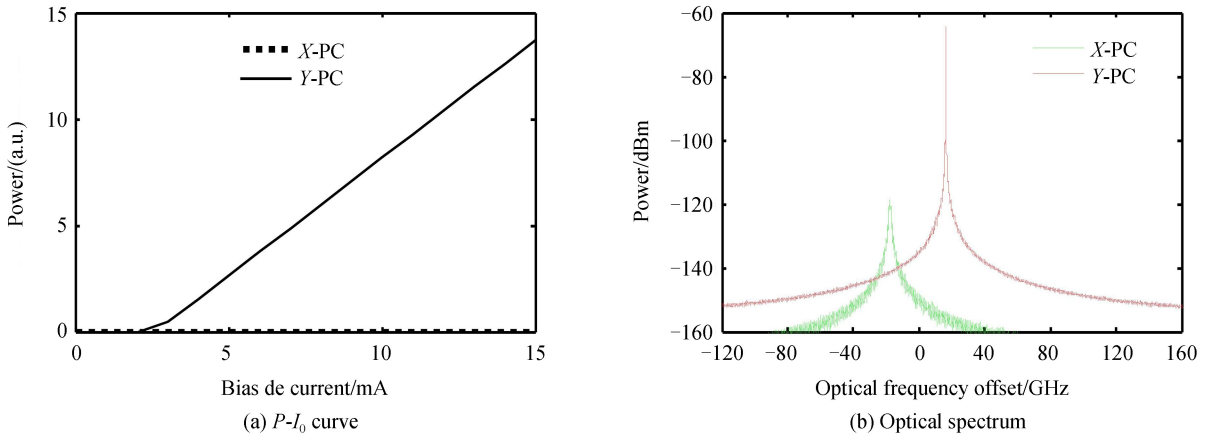
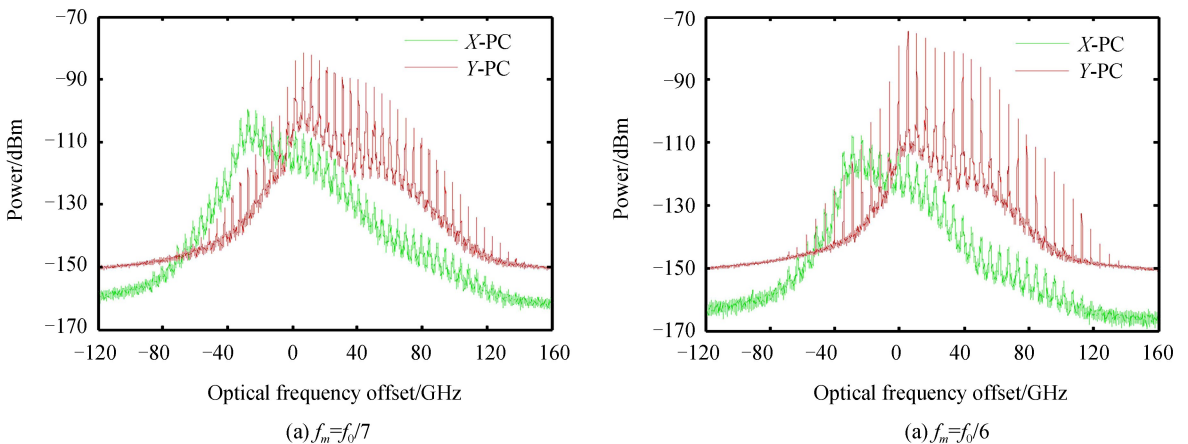


图 2 1 550 nm-VCSEL 自由运行的 $P-I_0$ 曲线和 $I_0 = 11.5 \text{ mA}$ 时的光谱

Fig.2 $P-I_0$ curve of a free-running 1 550 nm-VCSEL and optical spectrum for $I_0 = 11.5 \text{ mA}$

2.1 电流调制 1 550 nm-VCSEL 的输出特性

首先,分析 1 550 nm-VCSEL 在电流调制下输出 OFC 的特性.由于该激光器的两个偏振分量的频率间隔 f_0 为 34.00 GHz,为使这两个偏振分量的 OFCs 的梳线能够完全重合,此频率间隔应该等于调制频率的整数倍,即 $f_0 = n \cdot f_m$ (n 取整数).图 3 为 1 550 nm-VCSEL 在不同电流调制参数下的光谱,对应的调制参数分别为:(a) $(m, f_m) = (1.3, f_0/7)$; (b) $(m, f_m) = (1.3, f_0/6)$; (c) $(m, f_m) = (1.3, f_0/5)$; (d) $(m, f_m) = (1.3, f_0/4)$.本文用带宽(Bandwidth, BW)和载噪比(Carrier-Noise Ratio, CNR)来表征 OFC 的质量:BW 定义为从光谱的最大峰值下降 10 dB 所包含的频率范围;CNR 表示载波与噪声的比值,即光谱的最大峰值与其相邻的谷值之差.据此分析,图 3 (a) ~ (d) 中的 (BW, CNR) 分别为 (43.67 GHz, 24.70 dB)、(45.36 GHz, 36.00 dB)、(40.80 GHz, 47.10 dB)、(34.00 GHz, 56.95 dB).综合分析这 4 个图,可以看出:Y-PC 的光谱均呈现频率间隔为相应调制频率的一系列梳线,尽管 X-PC 处于被抑制状态,但也表现出电流调制效应.在下面的讨论中,选取电流调制参数 (m, f_m) 为 $(1.3, f_0/6)$ 和 $(1.3, f_0/5)$ 两种情况进行相关研究.



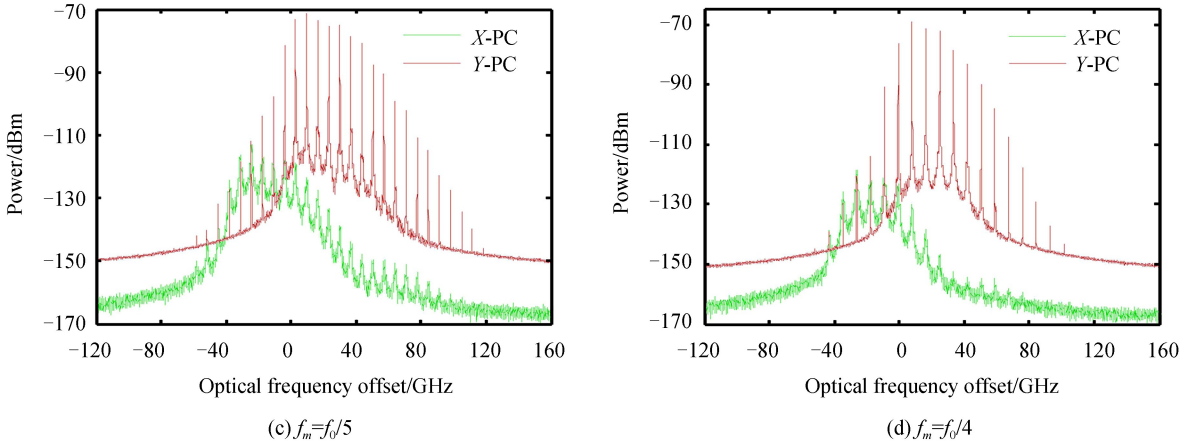
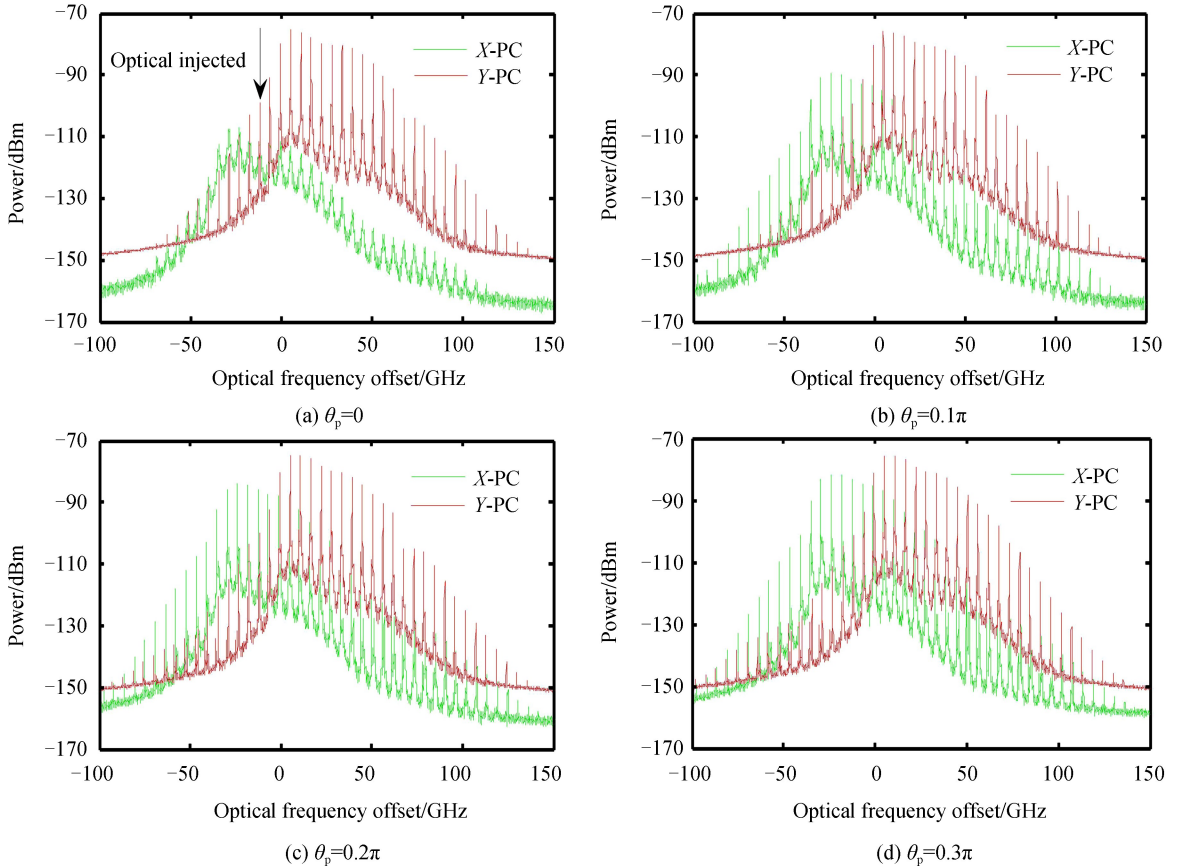


图 3 1 550 nm-VCSEL 在不同电流调制参数下输出的两个偏振分量的光谱

Fig.3 Optical spectra of two polarization components output from a 1 550 nm-VCSEL under different current modulation parameters

2.2 光注入电流调制 1 550 nm-VCSEL 的输出特性

研究注入光的线偏角 θ_p 对电流调制 1 550 nm-VCSEL 输出 OFC 特性的影响.在固定注入场振幅 $E_{inj} = 0.07$ 的情况下,图 4 和图 5 分别给出了 1 550 nm-VCSEL 在 $(f_m, \Delta\nu)$ 为 $(f_0/6, -12.60 \text{ GHz})$ 和 $(f_0/5, -10.77 \text{ GHz})$ 时两个偏振正交分量输出的 OFC 的光谱.由于 1 550 nm-VCSEL 在不同调制频率下输出的 OFC 的峰值位置不同,所以注入光的频率失谐 $\Delta\nu$ 也会发生相应变化.如图 4(a) 所示,当 $\theta_p = 0$ 时,即注入光的振动方向与 Y-PC 的方向相同时,此时 X-PC 处于被抑制状态,Y-PC 的 (BW, CNR) 为 (45.36 GHz, 36.83 dB).当 θ_p 增加到 0.1π 时,如图 4(b) 所示,Y-PC 与 X-PC 的光谱峰值之差为 15.02 dB,表明 X-PC 还处于被抑制状态,与图 4(a) 相比,X-PC 强度显著增加.当 θ_p 增加到 0.2π 时,如图 4(c) 所示,Y-PC 与 X-PC 的光谱峰值之差为 8.2 dB,说明两个偏振正交的 OFC 出现共存现象,Y-PC 的 OFC 的 (BW, CNR) 为



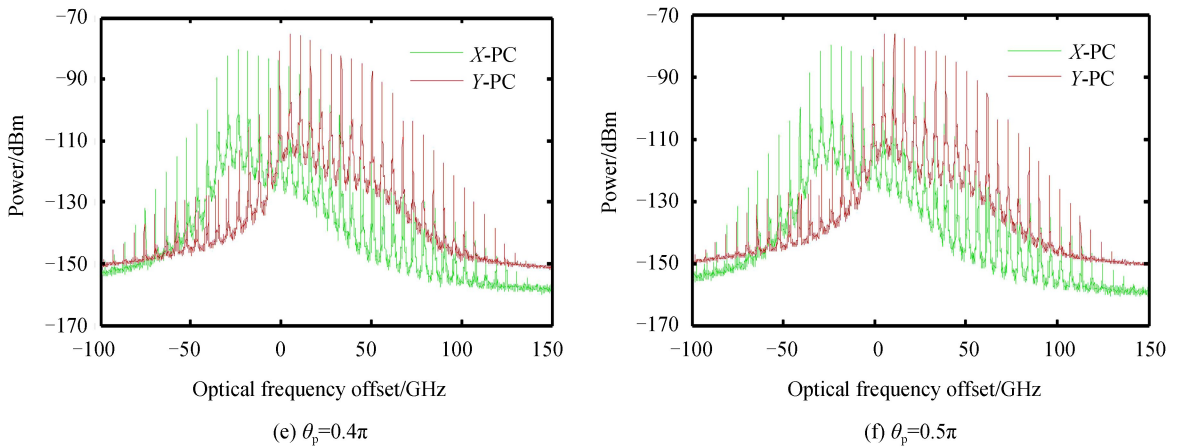
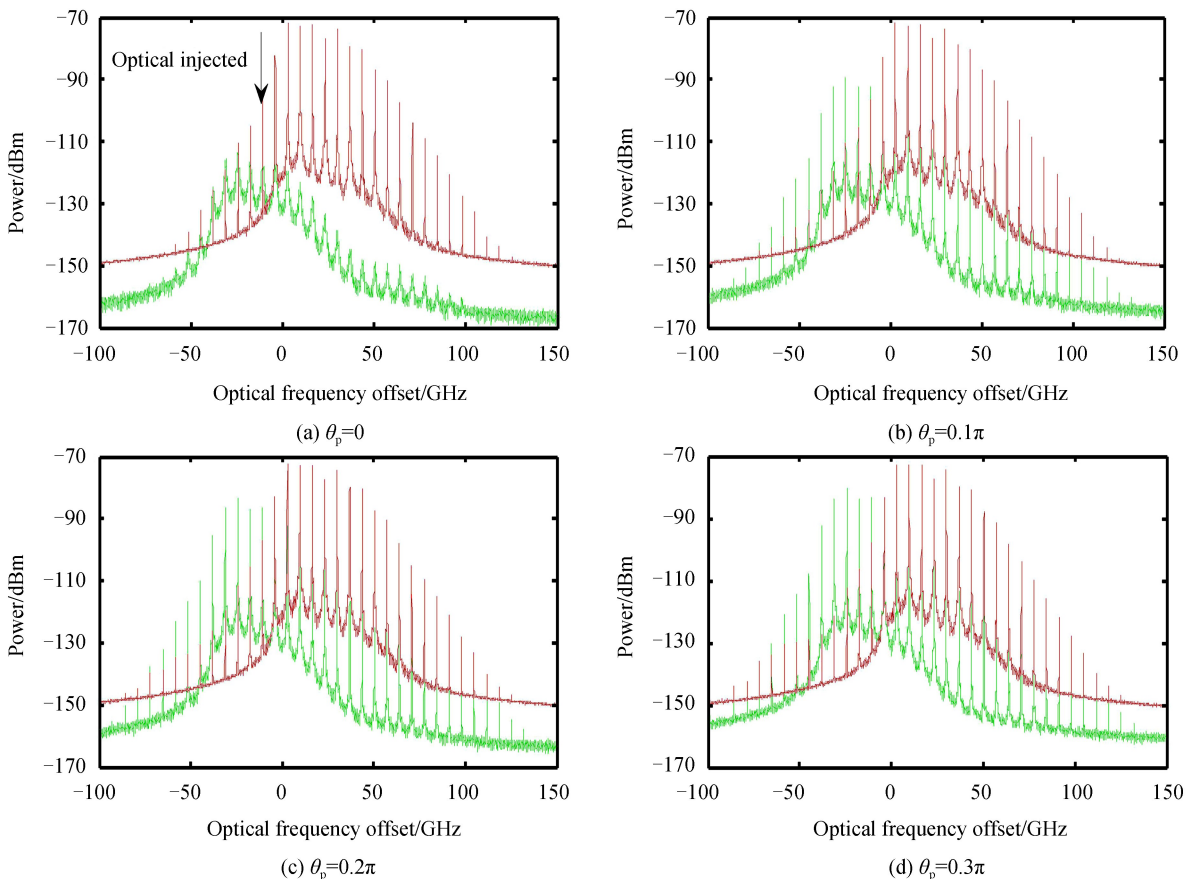


图 4 $f_m = f_0/6$, $\Delta\nu = -12.60$ GHz 时,不同 θ_p 下 1 550 nm-VCSEL 输出的两个偏振分量的光谱
 Fig.4 Optical spectra of two polarization components output from an optical injected 1550 nm-VCSEL under different linear polarization angle θ_p for $f_m = f_0/6$ and $\Delta\nu = -12.60$ GHz

(45.36 GHz, 36.63 dB), X-PC 的 OFC 的 (BW, CNR) 为 (51.03 GHz, 34.97 dB). 当 θ_p 继续增加为 0.3π , 0.4π , 0.5π 时, 如图 4(d)~(f) 所示, Y-PC 与 X-PC 的光谱峰值之差逐渐减小; 两个偏振正交 OFC 的 BW 保持不变; Y-PC 的 OFC 的 CNR 保持不变, 而 X-PC 的 OFC 的 CNR 分别为 35.8 dB、37.69 dB、37.73 dB. 因此, 随着 θ_p 的增加, Y-PC 与 X-PC 的光谱峰值之差逐渐减小, 这是由于 θ_p 越大则注入光中分配到 X-PC 的份额越多的缘故; X-PC 和 Y-PC 的 BW 分别稳定在 51.03 GHz 和 45.36 GHz; X-PC 的 CNR 呈现先逐渐增大而后稳定的趋势, Y-PC 的 CNR 不变. 至于 $(f_m, \Delta\nu) = (f_0/5, -10.77$ GHz) 时的情形, 如图 5 所示. 当 θ_p 增加为 0.2π 时, 两个偏振正交 OFC 共存, X-PC 和 Y-PC 的 OFCs 的 BW 分别为 34.00 GHz 和 40.80 GHz, 而 X-PC 和 Y-PC 的 CNR 变化的趋势和图 4 类似. 另外, 图 4 和图 5 的结果还显示: 相比较而言, θ_p 对 X-PC 输出的影响更明显. 其原因是光注入影响的明显程度取决于注入光相对于无注入时该偏振分量的相对强度. 由于



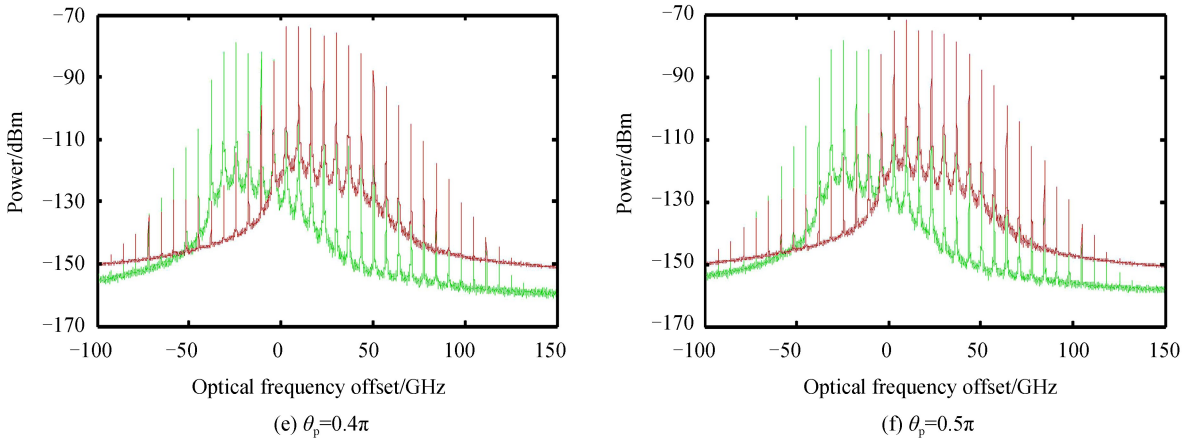
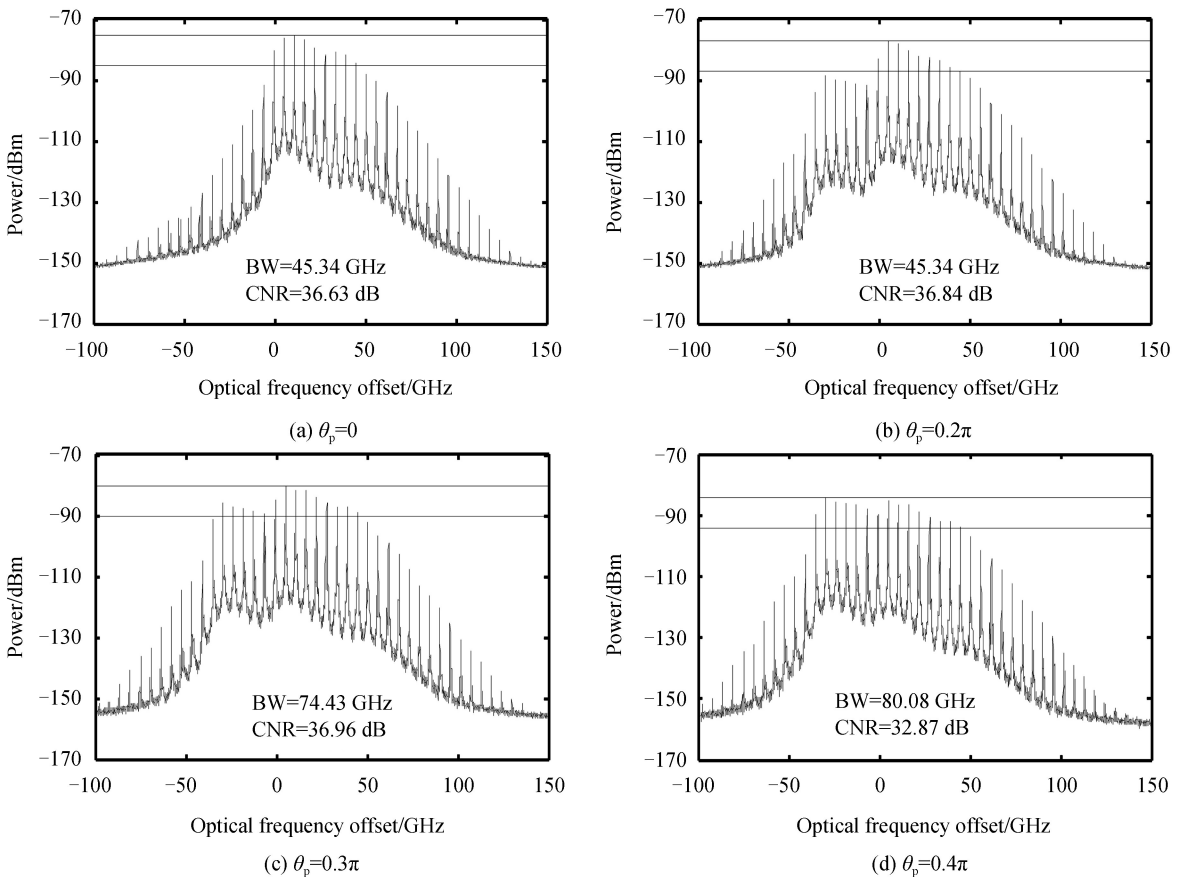


图 5 当 $f_m = f_0/5$, $\Delta\nu = -10.77$ GHz 时,不同 θ_p 下 1 550 nm-VCSEL 输出的两个偏振分量的光谱
 Fig.5 Optical spectra of two polarization components output from an optical injected 1 550 nm-VCSEL under different linear polarization angle θ_p for $f_m = f_0/5$ and $\Delta\nu = -10.77$ GHz

在无注入时,X-PC 的输出非常弱,从而 X-PC 受注入参数 θ_p 的变化会更明显。

2.3 偏振角 θ 对光注入电流调制 1 550 nm-VCSEL 输出的 OFC 的影响

由前面的讨论可知,线偏振光注入电流调制的 1 550 nm-VCSEL 能够输出两个偏振正交的 OFC.为了获得偏振特性一致、宽带宽的 OFC,本文引入一个偏振片 P,将两个偏振正交的 OFC 引导到 P 的透振方向上进行光谱拼接,从而获得一个偏振特性一致的宽带宽 OFC.接下来,本文进一步研究偏振角 θ 对拼接后 OFC 的 BW 的影响.以 1 550 nm-VCSEL 在 $\theta_p = 0.2\pi$ 时输出的偏振正交的 OFC 为研究对象.图 6 给出了 1 550 nm-VCSEL 在 $f_m = f_0/6$ 时输出的偏振正交 OFC 在不同偏振角 θ 下进行光谱拼接得到的光谱.如图 6 (a)所示,当 $\theta = 0$ 时,即 P 的透振方向与 Y-PC 相同,则拼接光谱中只有 Y-PC 的 OFC,其 BW 和 CNR 分别为 45.36 GHz 和 36.63 dB.当 $\theta = 0.2\pi$ 时(如图 6(b)所示),拼接得到的 OFC 由 Y-PC 和 X-PC 的 OFC 在偏



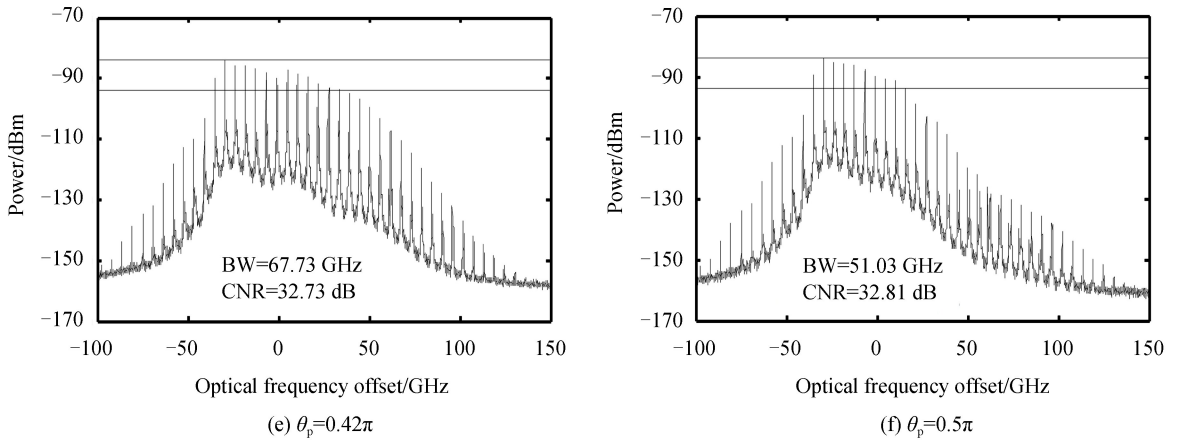
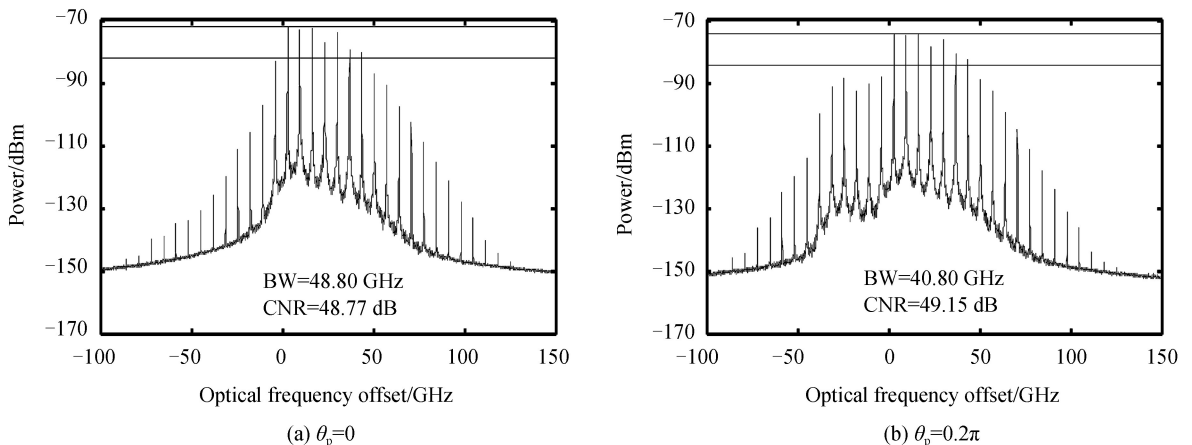


图 6 当 $f_m = f_0/6$, $\Delta\nu = -12.60$ GHz, $\theta_p = 0.2\pi$ 时, 1 550 nm-VCSEL 输出的两个偏振分量在不同 θ 下拼接后的光谱
Fig.6 Spliced optical spectra via a polarizer under different values of polarization angle θ for $f_m = f_0/6$, $\Delta\nu = -12.60$ GHz and $\theta_p = 0.2\pi$

振片 P 方向叠加而成。可以看出, 光谱在低频处的梳线强度增加, 但其峰值与光谱最大峰值之比大于 10 dB, 因此 BW 没变化, CNR 有微小的变化 (36.55 dB)。当 $\theta = 0.3\pi$ 时 (如 6(c) 所示), 由于低频处的梳线强度进一步增加, OFC 的 BW 增加到 74.43 GHz, CNR 为 36.96 dB。当 $\theta = 0.4\pi$ 时 (如图 6(d) 所示), OFC 变得较平坦, 其 BW 进一步增加, 达到 80.08 GHz。此时的 CNR 降为 32.87 dB, 其原因是光谱的最大峰值为 X-PC 的 OFC。当 $\theta = 0.42\pi$ 时 (如图 6(e) 所示), OFC 在高频部分的梳线降低, 其 BW 变为 67.73 GHz, CNR 为 32.73 dB。当 $\theta = 0.5\pi$ 时 (如图 6(f) 所示), 表明 P 的透振方向与 X-PC 相同, 则经过 P 后的光谱只有 X-PC 的 OFC, 其 BW 为 51.03 GHz, CNR 为 32.81 dB。经上述分析可知, 当偏振角 θ 由 0 增加到 0.5π 时, 经过 P 拼接得到的 OFC 的 BW 先保持不变, 然后增加, 再减小; CNR 先保持不变 (与 Y-PC 的 CNR 的值相同), 后减小 (与 X-PC 的 CNR 的值相同)。

图 7 给出了 1 550 nm-VCSEL 在 $f_m = f_0/5$ 时输出偏振正交的 OFC 经过 P 后, 在不同的透振方向下获得的 OFC。经分析对比图 6 与图 7 可知, 当偏振角 θ 由 0 增加到 0.5π 的过程中, 在 $f_m = f_0/6$ 与 $f_m = f_0/5$ 两种情况下光谱拼接所获得的 OFC 的 BW 和 CNR 的变化趋势类似。

以上的研究表明, 对于给定的线偏角 θ_p , 拼接得到的 OFC 的 BW 和 CNR 都与偏振角 θ 有关。图 8 为 $(f_m, \Delta\nu) = (f_0/6, -12.60$ GHz), θ_p 取不同值时, 拼接所得的 OFC 的 BW 和 CNR 随 θ 的变化情况。由图 8 (a) 可知, 从整体来看, 随 θ 的增加, OFC 的 BW 呈现先增加后减小的趋势。其原因可以解释为: 当 θ 较小时, 在偏振片 P 的透振方向上主要体现为 Y-PC 的 OFC, 因此 OFC 的 BW 表现为 Y-PC 的 OFC 的 BW。随着 θ 的增加, Y-PC 的 OFC 在 P 的透振方向上强度逐渐降低, 而 X-PC 的 OFC 的强度逐渐增加, 当二者的谱线相对平坦时, OFC 的 BW 增加。继续增加 θ , 当在 P 的透振方向上主要表现为 X-PC 的 OFC 时, 拼接的 OFC 的



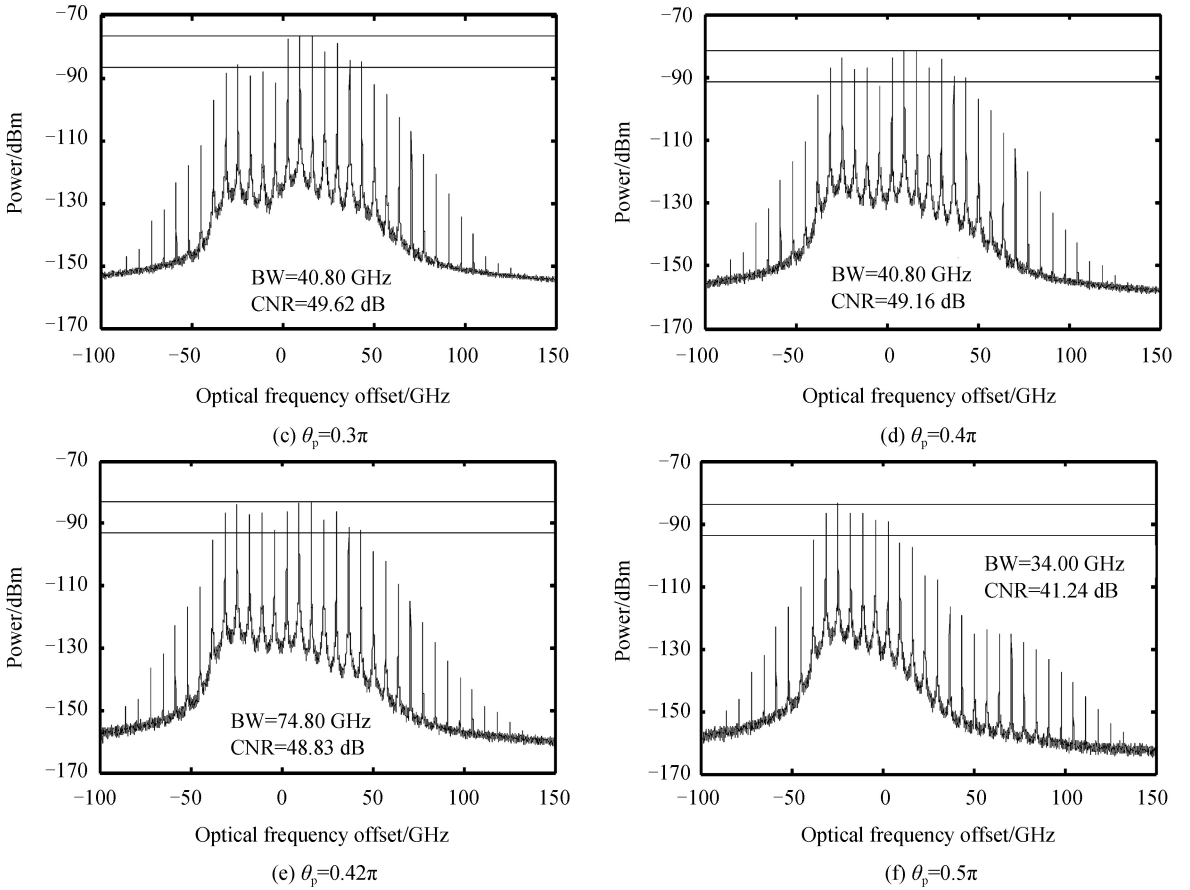


图 7 当 $f_m = f_0/5$, $\Delta\nu = -10.77$ GHz, $\theta_p = 0.2\pi$ 时, VCSEL 输出的两个偏振分量在不同 θ 下拼接后的光谱
 Fig.7 Spliced optical spectra via a polarizer under different values of polarization angle θ for for $f_m = f_0/5$, $\Delta\nu = -10.77$ GHz and $\theta_p = 0.2\pi$

BW 减小,最终减小为 X-PC 的 OFC 的 BW.另外,当 θ_p 值较大时,Y-PC 与 X-PC 输出的 OFC 光谱峰值相差较小,因此在相对较小的 θ 下就能够获得偏振特性一致的宽带的 OFC.由图 8(b)可以看出, θ 从 0 增加的过程中,当 Y-PC 的 OFC 在偏振片的透振方向上主导时,拼接得到的 OFC 的 CNR 主要表现为 Y-PC 的 OFC 的 CNR 值;当 θ 增加至 X-PC 的 OFC 在透振方向上占主导时,拼接的 OFC 的 CNR 突然变化到另一个值,即 X-PC 的 OFC 的 CNR 值.图 9 进一步给出了 $(f_m, \Delta\nu) = (f_0/5, -10.77$ GHz), θ_p 取不同值时拼接所得的 OFC 的 BW 和 CNR 随 θ 的变化,与图 8 相比具有类似的变化趋势.

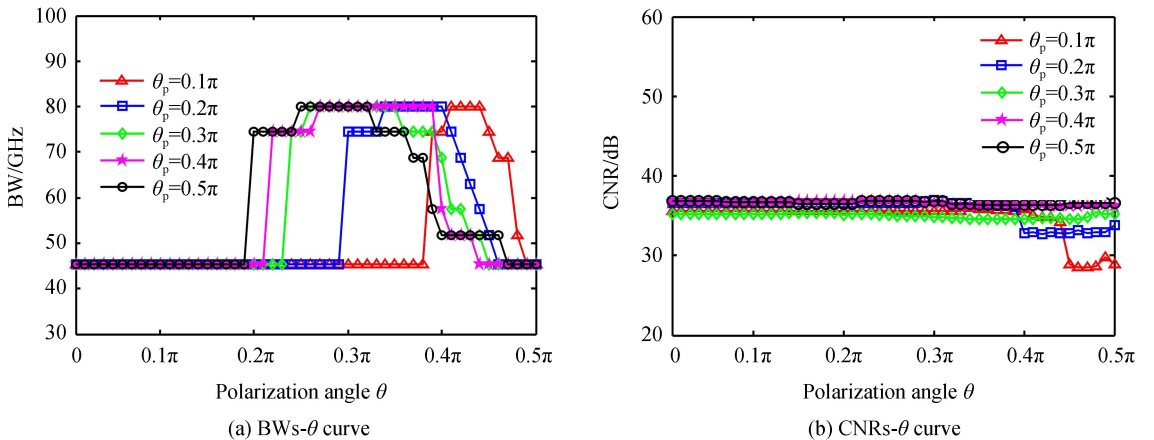


图 8 当 $f_m = f_0/6$, $\Delta\nu = -12.60$ GHz, θ_p 取不同值时 OFC 的 BW 和 CNR 随 θ 的变化曲线
 Fig.8 Variations of the OFC bandwidths with the polarization angle θ under different optical injected linear polarization angle θ_p for $f_m = f_0/6$ and $\Delta\nu = -12.60$ GHz

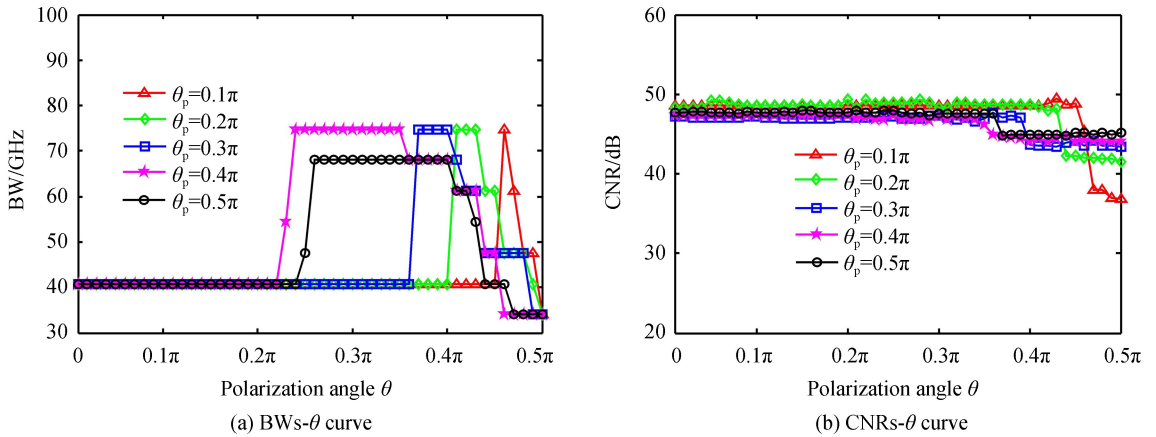


图9 当 $f_m = f_0/5$, $\Delta\nu = -10.77$ GHz, θ_p 取不同值时 OFC 的 BW 和 CNR 随 θ 的变化曲线

Fig.9 Variations of the OFC bandwidths with the polarization angle θ under different optical injected linear polarization angle θ_p for $f_m = f_0/5$ and $\Delta\nu = -10.77$ GHz

3 结论

本文提出了基于光注入下电流调制 1 550 nm-VCSEL 获取宽带 OFC 的方案.采用自旋反转模型,数值分析了产生的 OFC 的特性.研究表明:在给定的参数下,一 1 550 nm-VCSEL 自由运行时的阈值电流约为 2.6 mA,处于 Y-PC 激射而 X-PC 被抑制的输出状态(二者光谱主峰之比大于 30 dB);当该激光器在某一固定直流偏置时受到大信号调制作用且调制频率 f_m 满足关系式 $f_m = f_0/n$ (f_0 为 1 550 nm-VCSEL 中两正交偏振模式频率差, n 为整数)时,主振荡模 Y-PC 可输出带宽约为 45 GHz 的 OFC 而 X-PC 仍处于被抑制状态.进一步将一线偏振光注入该电流调制 1 550 nm-VCSEL,通过调节线偏角 θ_p ,可使激光器的两个偏振分量均实现 OFC 输出(光谱主峰比小于 15 dB).最后,将输出的两路正交偏振 OFC 经过一个偏振片实现拼接,通过适当调节偏振片的透振方向,可获得一路带宽超过 80 GHz 的 OFC.对于一个给定的线偏角 θ_p ,光谱拼接所得到的 OFC 的带宽随偏振角 θ ($0 \leq \theta \leq \pi/2$) 的增加而呈现先增加后减小的趋势而其载噪比则从一个偏振分量 OFC 的载噪比变为另一个偏振分量 OFC 的载噪比.尽管本文的 OFC 带宽与文献[28]的结果相当,但由于本方案所获得的 OFC 中所有的梳线具有相同的偏振方向,因此在偏振敏感的相关应用中更具潜力.

参考文献

- [1] UDEM T, HOLZWARHTH R, HANSCH T W, *et al.* Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, **416**(6877): 233-237.
- [2] NEWBURY N R. Searching for applications with a fine-tooth comb[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(4): 186-188.
- [3] ZHU F, MOHAMED T, STROHABER J, *et al.* Real-time dual frequency comb spectroscopy in the near infrared[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(12): 121116.
- [4] WANG Jia-qi, ZOU Xi-hua, LI Pei-xuan. Programmable microwave photonic filter based on fully digital optical frequency comb[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1023001.
王家琦, 邹喜华, 李沛轩. 基于全数控光频梳的可编程微波光子滤波器[J]. 光子学报, 2018, **47**(10): 1023001.
- [5] LIU Ting-yang, ZHANG Fu-min, WU Han-zhong, *et al.* Absolute distance ranging by means of chirped pulse Interferometry[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(2): 020601.
刘亭洋, 张福民, 吴翰钟, 等. 光学频率梳啁啾干涉实现绝对距离测量[J]. 物理学报, 2016, **65**(2): 020601.
- [6] GAT O, KIELPINSKI D. Frequency comb injection locking of mode locked lasers[J]. *New Journal of Physics*, 2013, **15**(3): 033040.
- [7] SUPRADEEPA V R, WEINER A M. Bandwidth scaling and spectral flatness enhancement of optical frequency combs from phase-modulated continuous-wave lasers using cascaded four-wave mixing[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(15): 3066-3068.
- [8] LIU Hao-ming, PAN Wei, LU Bing, *et al.* Generation of flat optical frequency comb based on asynchronous RF-signal-driven cascaded phase modulators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(12): 1206002.
刘昊明, 潘炜, 卢冰, 等. 基于异步射频信号驱动级联相位调制器产生平坦光学频率梳[J]. 中国激光, 2018, **45**(12): 1206002.

- [9] DUILLS P Ó, ANANDARAJAH P M, ZHOU Rui, *et al.* Numerical investigation into the injection-locking phenomena of gain switched lasers for optical frequency comb generation[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(21): 211105.
- [10] ANANDARAJAH P M, DUILLS P Ó, ZHOU Rui, *et al.* Enhanced optical comb generation by gain-switching a single-mode semiconductor laser close to its relaxation oscillation frequency[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, **21**(6): 1801609.
- [11] ZHU Hua-tao, WANG Rong, PU Tao, *et al.* A novel approach for generating flat optical frequency comb based on externally injected gain-switching distributed feedback semiconductor laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, **14**(2): 026201.
- [12] ROSADO A, PEREZ-SERRANO A, TIJERO J M G, *et al.* Experimental study of optical frequency comb generation in gain-switched semiconductor lasers[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, **108**: 542-550.
- [13] TAN Jian-feng, ZHANG Qing-hai, YU Wei, *et al.* Chaotic dynamic behaviors of vertical cavity surface emitting laser with delayed optical feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 272-276.
谭建锋,张胜海,王伟,等. 延迟光反馈 VCSEL 的混沌动力学特性[J]. 光子学报, 2011, **40**(2): 272-276.
- [14] LIANG Qing, FAN Li, YANG Ji-yun, *et al.* Narrow-linewidth photonic microwave acquisition based on an optically injected 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under optoelectronic negative feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0314001.
梁卿,樊利,杨继云,等. 基于光电负反馈的光注入 1550 nm 垂直腔面发射激光器产生窄线宽微波信号[J]. 光子学报, 2017, **46**(3): 0314001.
- [15] COARER F D, QUIRCE A, PEREZ 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): 180910.
- [16] 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.
- [17] PANAJOTOV K, GATARE I, VALLE A, *et al.* Polarization- and transverse-mode dynamics in optically injected and gain-switched vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **45**(11): 1473-1481.
- [18] YU Yuan, DONG Jian-ji, XU Enming, *et al.* Single passband microwave photonic filter with continuous wideband tunability based on electro-optic phase modulator and Fabry-Pérot semiconductor optical amplifier[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(23):3542-3550.
- [19] JIANG Xiao-wei, GUAN Bao-lu. Wavelength tunable vertical cavity surface emitting laser based on guided mode resonance filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 0114005.
江孝伟,关宝璐. 基于导模共振滤波器的波长可调谐垂直腔面发射激光器的研究[J]. 光子学报, 2019, **48**(12): 0114005.
- [20] CHEN JIAN-jun, WU ZHENG-mao, DENG Tao, *et al.* Current- and feedback-induced state bistability in a 1550 nm-VCSEL with negative optoelectronic feedback[J], *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(1): 1500310.
- [21] HURTADO A, QUIRCE A, VALLE A, *et al.* Nonlinear dynamics induced by parallel and orthogonal optical injection in 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs)[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9423-9428.
- [22] SERRANO Á R C, FERNANDEZ C D D, CANO E P, *et al.* VCSEL-based optical frequency combs: toward efficient single-device comb generation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(20): 1981-1984.
- [23] CANO E P, FERNANDEZ C D D, SERRANO Á R C, *et al.* Experimental study of VCSEL-based optical Frequency comb generators[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(21): 2118-2121.
- [24] PRIOR E, DIOS C D, ORTSIEFER M, *et al.* Understanding VCSEL-based gain switching optical frequency combs: experimental study of polarization dynamics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(22): 4572-4579.
- [25] PRIOR E, DIOS C D, CEIADO R, *et al.* Dynamics of dual-polarization VCSEL-based optical frequency combs under optical injection locking[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(17): 4083-4086.
- [26] PRIOR E, DIOS C D, CRIADO A R, *et al.* Expansion of VCSEL-based optical frequency combs in the sub-THz span: comparison of non-linear techniques[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(17): 4134-4141.
- [27] QUIRCE A, DIOS C D, VALLE A, *et al.* Polarization dynamics in VCSEL-based gain switching optical frequency combs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(10): 1798-1806.
- [28] QUIRCE A, DIOS C D, VALLEA, *et al.* VCSEL-based optical frequency combs expansion induced by polarized optical injection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, **25**(6): 1500109.