

500 GHz 宽带双偏振光学频率梳的产生

庞海越¹, 李沼云^{1,2}, 刘欢¹, 陶智勇¹, 樊亚仙^{1*}¹ 桂林电子科技大学信息与通信学院广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004;² 中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541004

摘要 提出了一种基于光电反馈产生 500 GHz 宽带双偏振光学频率梳的方案。该方案基于光电环路反馈 1550 nm 垂直腔面发射激光器, 采用自旋反转模型, 利用四阶龙格-库塔算法数值仿真研究了光电反馈参数对光学频率梳特性的影响。研究表明: 通过光电反馈参数的调节可以控制 1550 nm 垂直腔面发射激光器输出的偏振状态, 可实现 Y 偏振和 X 偏振光学频率梳的转换。此外, 研究发现, 在特定的光电反馈参数条件下, 可获得 Y 偏振和 X 偏振同时存在的双偏振光学频率梳。并且在一定的光电反馈参数范围内, 两个偏振方向的光学频率梳的光谱带宽都会随着光电反馈系数的增加而增大, 相应的功率谱会随光电反馈系数的增加而变得越来越平坦。通过光电反馈系数及反馈时间的调节, 获得了谱线平坦、梳线纯净、谱带超宽的光学频率梳, 在 10 dB 幅度范围内 Y 偏振光学频率梳的光谱带宽可达 250 GHz, X 偏振光学频率梳的光谱带宽可达 500 GHz。

关键词 激光光学; 光学频率梳; 光电反馈; 垂直腔面发射激光器; 双偏振

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0901003

1 引言

光学频率梳(OFC)由一系列间隔均匀的离散光谱成分组成, 这些梳状光谱成分保持着高度的光谱相干性。OFC 由于具有谱线数目多、频率范围宽、谱线间隔均衡, 以及频率稳定性高等优势, 被广泛应用于计量学、光谱学、光学任意波形产生、太赫兹频率计量和分析、微波光子学, 以及光通信^[1-8]等领域, 近年来受到人们的广泛关注。

在现有的 OFC 获取技术中, 基于半导体激光二极管产生 OFC 是一种低成本、低能耗的有效方案。比如半导体激光器的锁模^[9-11]、电光调制^[12-15]和增益开关^[16-19]等, 均可以产生高质量的 OFC。这些技术方案大多采用的是分布反馈或离散模式的边缘发射半导体激光器。相对于边缘发射的半导体激光器而言, 垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有阈值电流低、光纤耦合效率高、动态单纵模输出、制作成本低, 以及易于集成高密度二维阵列等独特的优势^[20-21], 从而使 OFC 系统结构更加紧

凑, 能耗更低。由于腔内介质的各向异性, VCSEL 可输出两个正交的偏振分量。当改变施加在 VCSEL 上的偏压电流时, 可以使两个正交的偏振模式发生偏振转换^[22-23]。这些特性使 VCSEL 产生的 OFC 具有双偏振、相互正交以及功率均衡等特点, 使其在偏分复用光纤通信、光谱分析, 以及精细计量等应用领域更具优势。近年来基于 VCSEL 产生 OFC 的相关理论和实验研究已取得一些进展。为了提高 OFC 的光谱带宽, 相关的技术如光注入、偏振模式叠加等相继被提出。如: 2015 年 Prior 等^[18]实验证明 VCSEL 在电流调制作用下, 可同时产生正交偏振 OFC, 进一步经过偏振模式叠加来提高 OFC 的带宽; 2016 年该小组^[24]采用可变偏振光注入 VCSEL 中得到了两路相互正交、强度相当的 OFC, 进一步通过合并两个正交 OFC 的光谱, 获得功率变化在 20 dB 范围内带宽为 140 GHz 的 OFC。2019 年 Quirce 等^[25]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, 通过将 X 偏振和 Y 偏振

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-10-16; 录用日期: 2020-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(12064005)

*E-mail: yxfan@guet.edu.cn

OFC 进行叠加可提高光谱带宽,进一步优化注入参数,能够进一步提高叠加后 OFC 的带宽;2019 年 Li 等^[26]将光注入电流调制的 1550 nm-VCSEL 输出的 X 偏振和 Y 偏振 OFC 进行叠加,理论上获取了光谱带宽超过 80 GHz 的 OFC。2020 年 Fan 等^[27]提出了基于正交光注入增益开关 850 nm-VCSEL 获取双路宽带 OFC 的方案,理论获取了光谱带宽超过 105 GHz 的双路 OFC。以上方案通常需要两个激光器,系统较为复杂,需要调控的参量较多,而且即使采用偏振模式叠加技术,OFC 的光谱带宽还是不够宽,限制了其在偏分复用光通信、超快激光动力学以及距离测量等领域的应用^[18,28]。因此,基于 VCSEL 产生的 OFC 技术方案还需要进一步改进,尤其是在保持优势的同时还需提高光谱带宽及平坦度。

本文提出一种基于光电反馈 1550 nm-VCSEL 获取宽带 OFC 的方案。该方案只需要一个激光器,系统结构简单,易于调控,无须采用偏振模式叠加技术也能够获得宽带较宽的 OFC。通过调节系统中的光电反馈强度及光电反馈时间,可获取谱线平坦、梳线纯净的超宽带线性偏振 OFC,有望应用于高速长距离偏分复用光纤通信、超快动力学、计量等领域。

2 理论模型

基于光电反馈 1550 nm-VCSEL 获取 OFC 的方案示意图如图 1 所示,该方案主要是由 1550 nm-VCSEL、光隔离器(OI)、光分束器(FC)、可变光衰减器(VOA)、光电探测器(PD)、电放大器(EA)以及电耦合器(EC)构成一个光电反馈环路系统。1550 nm-VCSEL 输出的激光依次经过 OI、FC 后,一部分光信号作为探测信号输出,另一部分光信号经过 VOA 和 PD 后转换为电信号;接着,电信号经过 EA 放大后通过 EC,其中,一部分的电信号作为输出探测信号,另一部分的电信号反馈回 1550 nm-VCSEL。其调制机理为 1550 nm-VCSEL 输出的光信号由光电探测器检测转化为电信号,然后电信号以非规则的电流扰动形式施加于注入电流,通过对注入电流的扰动实现了对载流子密度的调制,导致 1550 nm-VCSEL 的增益系数出现非规则变化,促使激光输出呈现规则和不规则的脉冲状态,其中引起的规则脉冲状态可产生 OFC。由于光电反馈属于非相干反馈,其不受反馈外腔相位累积的影响,通过现有的电子技术可以非常便捷地进行有效调控。此外,该系统可获得光信号和电信号两路不同信号形式的 OFC 输出。

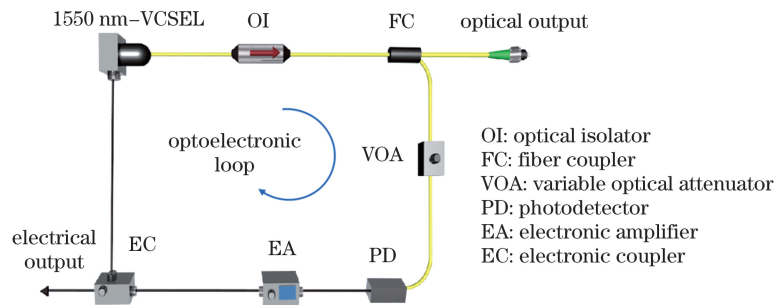


图 1 光电反馈 1550 nm-VCSEL 获取超宽带 OFC 的方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a ultra-broadband OFC generation based on a 1550 nm-VCSEL under optoelectronic feedback

根据 Martin-Regalado 和 Prati 等^[22]提出的自旋反转模型(SFM)的速率方程组,考虑在光电反馈

作用下,1550 nm-VCSEL 的两个正交偏振模式的速率方程可描述为^[29]

$$\frac{dE_x}{dt} = -(k + \gamma_a)E_x - i(k\alpha + \gamma_p)E_x + k(1 + i\alpha)(NE_x + inE_y) + \sqrt{\frac{\beta_{sp}\gamma_e}{2}} [\sqrt{N + n}\xi_+(t) + \sqrt{N - n}\xi_-(t)], \quad (1)$$

$$\frac{dE_y}{dt} = -(k - \gamma_a)E_y - i(k\alpha - \gamma_p)E_y + k(1 + i\alpha)(NE_y - inE_x) + i\sqrt{\frac{\beta_{sp}\gamma_e}{2}} [\sqrt{N - n}\xi_-(t) - \sqrt{N + n}\xi_+(t)], \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma_N N (1 + |E_x|^2 + |E_y|^2) + \gamma_N \mu \left[1 \pm \zeta \frac{(|E_x|^2 + |E_y|^2)(t - \tau)}{|E_{ox}|^2 + |E_{oy}|^2} \right] - i\gamma_N n (E_y E_x^* - E_x E_y^*), \quad (3)$$

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

式中:下标 x 和 y 分别表示 X 偏振分量(X -PC)和 Y 偏振分量(Y -PC); E 表示光场的慢变复振幅; N 表示 1550 nm-VCSEL 增益介质内导带和价带之间总的反转载流子密度; ζ 是光电反馈系数; τ 是光电反馈时间; $|E_{ox}|^2 + |E_{oy}|^2$ 代表 1550 nm-VCSEL 自由运行时相应电流情况下的输出功率; n 表示自旋向上能级和自旋向下能级对应的载流子密度之差; k 表示光场衰减率; α 为线宽增强因子; γ_a 和 γ_p 分别表示二向色性系数和有源介质双折射系数; γ_N 为总的载流子衰减速率; γ_s 为自旋反转速率; μ 为归一化偏置电流; ξ_+ 和 ξ_- 是两个相互独立的高斯白噪声源(方差为 1,平均值为 0); β_{sp} 为噪声源自发辐射速率。通过调节光电反馈系数 ζ 与光电反馈时间 τ ,1550 nm-VCSEL 可呈现出单周期、倍周期、准周期、混沌等丰富的非线性动力学状态。

3 分析与讨论

采用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)算法对速率方程组(1)~(4)式进行数值求解,仿真中所用的时间序列长度为 1000 ns,计算步长为 1 ps,具体参数取值如下^[30]: $\gamma_N = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_p = 192.1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$, $\alpha = 3$, $k = 300 \text{ ns}^{-1}$, $\beta_{sp} = 10^{-6}$ 。图 2 为 1550 nm-VCSEL 在自由运行时输出功率随归一化电流 μ 的变化曲线。当归一化电流 μ 达到 1 之后, Y -PC 开始激射, X -PC 处于被抑制状

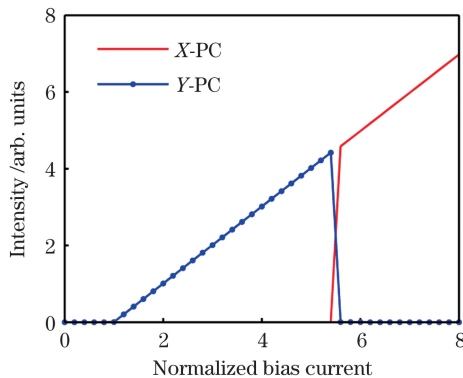


图 2 自由运行时 1550 nm-VCSEL 输出功率 p 随归一化偏置电流 μ 的变化曲线

Fig. 2 p - μ curves of a free-running 1550 nm-VCSEL

态。当归一化电流 μ 达到 5.5 之后, Y -PC 和 X -PC 出现偏振转换, X -PC 开始激射, Y -PC 处于被抑制状态。在所考察的归一化偏置电流范围内($1 < \mu \leq 8$),通过调节归一化偏置电流 μ ,可以选择 1550 nm-VCSEL 输出的 Y -PC 和 X -PC。

接着,在不同的光电反馈时间和光电反馈系数条件下,对 X -PC 和 Y -PC 的产生范围进行研究。图 3 给出了当归一化电流 $\mu = 5$,反馈时间 $\tau = 0.1, 0.3, 0.5 \text{ ns}$ 时,1550 nm-VCSEL 输出 X -PC 和 Y -PC 的功率极值随光电反馈系数 ζ 变化的分岔图。从图 3(a)中可以看出:当 $\mu = 5, \tau = 0.1 \text{ ns}$ 时,在 $0.08 \leq \zeta \leq 0.43$ 范围内,1550 nm-VCSEL 输出的 Y -PC 具有两个极值,其中一个极值趋于 0,说明此时 Y -PC 处于单周期脉冲态,而 X -PC 的极值都趋于 0,说明 X -PC 处于被抑制状态;当 $\zeta = 0.43$ 时, X -PC 和 Y -PC 出现偏振模式转换;在 $0.43 < \zeta \leq 0.64$ 范围内,1550 nm-VCSEL 输出的 X -PC 具有两个极值,其中一个极值趋于 0,说明此时 X -PC 处于单周期脉冲态,而 Y -PC 的极值都趋于 0,说明 Y -PC 处于被抑制状态;在 $\zeta > 0.64$ 范围内, X -PC 和 Y -PC 处于同时输出状态。由图 3(b)可知:当 $\mu = 5, \tau = 0.3 \text{ ns}$ 时,在 $0.12 \leq \zeta \leq 0.23, 0.30 \leq \zeta \leq 0.47$ 以及 $\zeta \geq 0.64$ 范围内, Y -PC 处于单周期脉冲态, X -PC 处于被抑制状态;在 $0.23 < \zeta < 0.30$ 范围内, Y -PC 处于二倍周期振荡状态;在 $0.47 < \zeta < 0.64$ 范围内, Y -PC 处于多周期和混沌振荡状态。当 $\mu = 5, \tau = 0.5 \text{ ns}$ 时,在 $0.10 \leq \zeta \leq 0.18, 0.51 \leq \zeta \leq 0.7$ 范围内, Y -PC 处于单周期脉冲态, X -PC 处于被抑制状态;在 $0.41 \leq \zeta \leq 0.50$ 范围内, X -PC 处于单周期脉冲态;如图 3(c)所示。

在光电反馈作用下,1550 nm-VCSEL 输出激光转换为电信号,并以非规则的电流扰动信号形式施加偏置电流,通过调节光电反馈强度和光电反馈时间,1550 nm-VCSEL 可处于注入锁定、单周期、多周期、混沌等丰富的动力学状态。利用 1550 nm-VCSEL 的单周期脉冲状态,可获取 X 偏振和 Y 偏振的 OFC(X -OFC 和 Y -OFC)。下面将以反馈时间 $\tau = 0.1 \text{ ns}$ 为例进行相关研究。

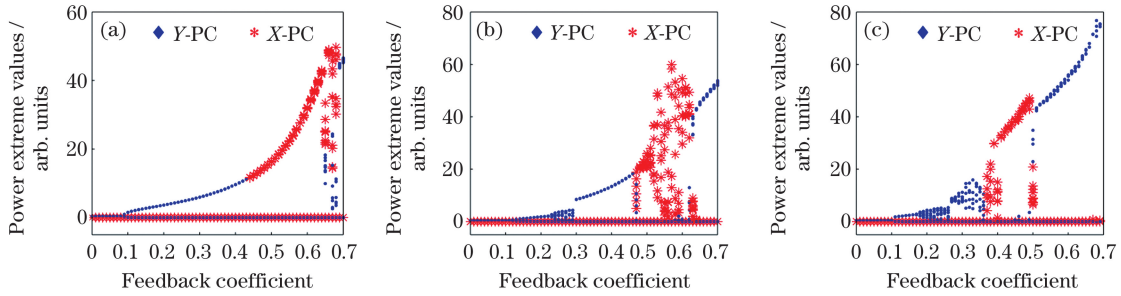


图 3 归一化电流 $\mu=5$ 时, 1550 nm-VCSEL 的 X-PC 和 Y-PC 的功率极值随光电反馈系数 ζ 变化的分岔图。
(a) $\tau=0.1$ ns; (b) $\tau=0.3$ ns; (c) $\tau=0.5$ ns

Fig. 3 Bifurcation diagrams of the power extreme values of X-PC and Y-PC outputs from a 1550 nm-VCSEL versus different optoelectronic feedback ζ under $\mu=5$. (a) $\tau=0.1$ ns; (b) $\tau=0.3$ ns; (c) $\tau=0.5$ ns

图 4 给出了当归一化电流 $\mu=5$ 、光电反馈时间 $\tau=0.1$ ns, 光电反馈系数 ζ 分别为 0.220、0.620 和 0.641 时, 1550 nm-VCSEL 的 X-PC 和 Y-PC 输出的时间序列 (第一、二列) 和光谱 (第三、四列)。当 $\mu=5, \tau=0.1$ ns, $\zeta=0.220$ 时, 1550 nm-VCSEL 的 X-PC 处于被抑制状态, Y-PC 处于激射并呈现单周期脉冲振荡状态, 故可获得 Y-OFC。此时, Y-PC 的时间序列 [图 4(a)] 显示其输出为时间间隔等于 0.225 ns 的规则脉冲。当 $\mu=5, \tau=0.1$ ns, $\zeta=$

0.620 时, 1550 nm-VCSEL 的 X-PC 处于激射并呈现单周期脉冲振荡状态, Y-PC 处于被抑制状态, 故可获得 X-OFC。X-PC 的时间序列 [图 4(f)] 显示其输出为时间间隔等于 0.138 ns 的规则脉冲。当 $\mu=5, \tau=0.1$ ns, $\zeta=0.641$ 时, 1550 nm-VCSEL 的 X-PC 和 Y-PC 同时振荡输出, 可同时获得 X-OFC 和 Y-OFC。其时间序列 [图 4(i) 和图 4(j)] 显示输出为时间间隔约等于 0.130 ns 的规则脉冲, 由图可知, 此时双偏振 OFC 的功率相当, 梳线纯净。

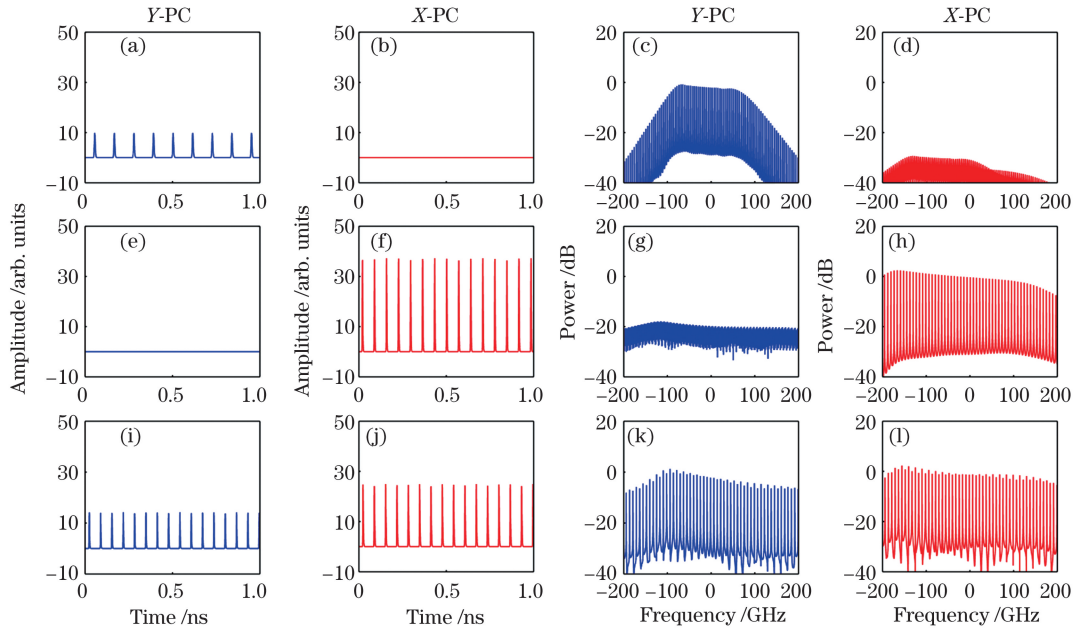


图 4 归一化电流 $\mu=5$ 、光电反馈时间 $\tau=0.1$ ns, 在不同的光电反馈系数 ζ 下, 1550 nm-VCSEL 输出的 X-PC 和 Y-PC 的时间序列 (第一、二列) 和光谱 (第三、四列)。(a)~(d) $\zeta=0.220$; (e)~(h) $\zeta=0.620$; (i)~(l) $\zeta=0.641$

Fig. 4 Time series (first and second columns) and optical spectra (third and fourth columns) of the X-PC and Y-PC outputs of 1550 nm-VCSEL under $\mu=5$ and $\tau=0.1$ ns with different value of ζ . (a)~(d) $\zeta=0.220$; (e)~(h) $\zeta=0.620$; (i)~(l) $\zeta=0.641$

接着, 进一步考察 OFC 的光谱带宽随光电反馈系数变化的情况。在本文中, OFC 的光谱带宽 B_w 定义为在光谱中梳线峰值下降 10 dB 所包含的连续

频率范围^[24]。图 5 给出了 $\mu=5, \tau=0.1$ ns, 光电反馈系数 ζ 分别 0.120, 0.200, 0.360, 0.430, 0.440, 0.520, 0.600, 0.664 时, 1550 nm-VCSEL 的 X-PC

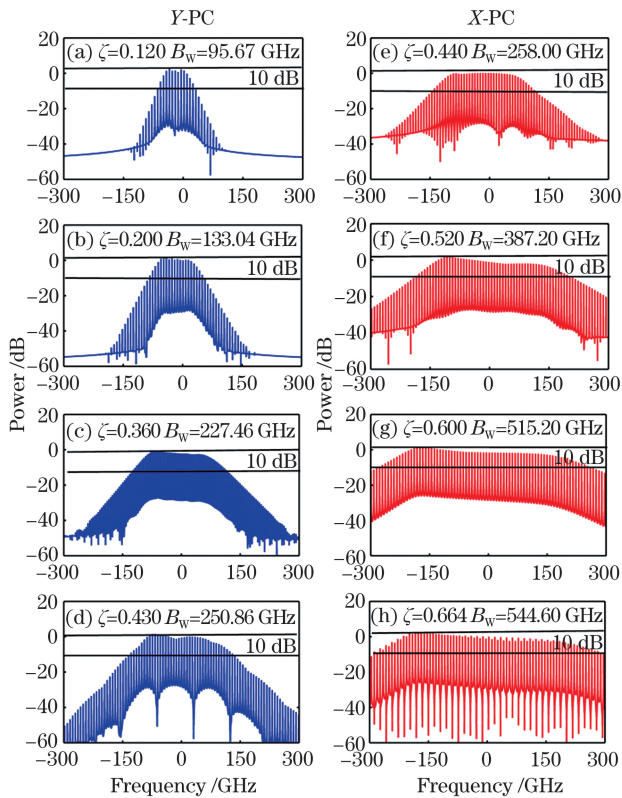


图 5 归一化电流 $\mu=5$ 、光电反馈时间 $\tau=0.1$ ns, 光电反馈系数 ζ 分别 0.120, 0.200, 0.360, 0.430, 0.440, 0.520, 0.600, 0.664 时, 1550 nm-VCSEL 的 Y-PC 和 X-PC 输出的光谱。(a)~(d) Y-PC 输出的光谱; (e)~(h) X-PC 输出的光谱

Fig. 5 Optical spectra of X-PC and Y-PC outputs of 1550 nm-VCSEL under $\mu=5$ and $\tau=0.1$ ns with different ζ , where Fig. 5 (a)–(h) correspond to $\zeta=0.120, 0.200, 0.360, 0.430, 0.440, 0.520, 0.600, 0.664$, respectively. (a)–(d) Optical spectra of Y-PC; (e)–(h) optical spectra of X-PC

和 Y-PC 输出的光谱。当 ζ 等于 0.120, 0.200, 0.360, 0.430 时, X-PC 模式处于被抑制状态, Y-PC 处于激射状态, 输出 Y-PC 的光谱如图 5(a)~(d) 所示, Y-OFC 的光谱带宽随光电反馈系数 ζ 的增大而增加, 分别为 95.67, 133.04, 227.46, 250.86 GHz。当 ζ 等于 0.440, 0.520, 0.600, 0.664 时, Y-PC 模式处于被抑制状态, X-PC 处于激射状态, 输出 X-PC 的光谱如图 5(e)~(h) 所示, X-OFC 的光谱带宽随光电反馈系数 ζ 的增大而增加, 分别为 258.00, 387.20, 515.20, 544.60 GHz。当 ζ 增大到 0.664 时, 光谱下方出现不规则毛刺, 继续增加光电反馈系数时, X-OFC 消失, 1550 nm-VCSEL 的 Y-PC 和 X-PC 出现无规则振荡。

图 6 为当归一化电流 $\mu=5$ 、光电反馈时间 $\tau=0.1$ ns、光电反馈系数 ζ 分别为 0.120, 0.200,

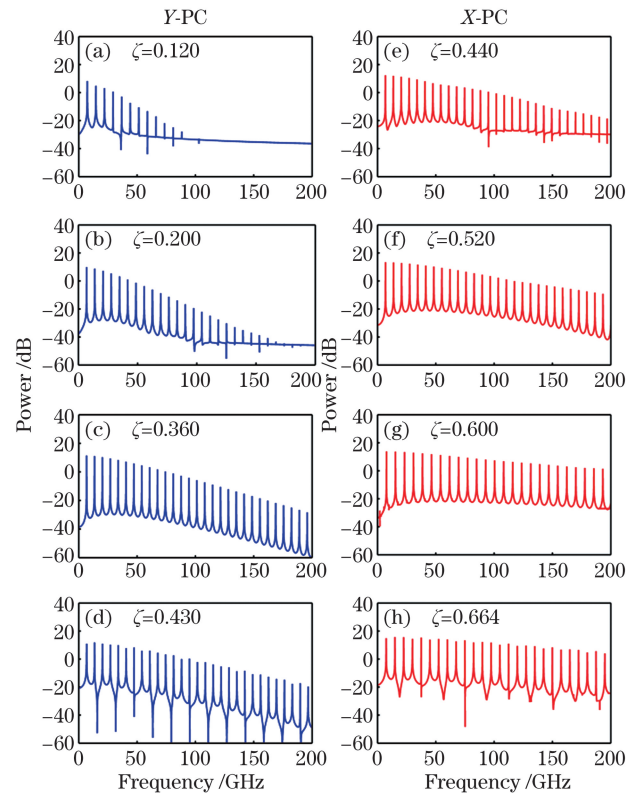


图 6 归一化电流 $\mu=5$ 、光电反馈时间 $\tau=0.1$ ns, 光电反馈系数 ζ 分别 0.120, 0.200, 0.360, 0.430, 0.440, 0.520, 0.600, 0.664 时, 1550 nm-VCSEL 的 Y-PC 和 X-PC 输出的功率谱。(a)~(d) Y-PC 输出的功率谱; (e)~(h) X-PC 输出的功率谱

Fig. 6 Power spectra of X-PC and Y-PC outputs of 1550 nm-VCSEL under $\mu=5$ and $\tau=0.1$ ns with different ζ , where Fig. 6(a)–(h) correspond to $\zeta=0.120, 0.200, 0.360, 0.430, 0.440, 0.520, 0.600, 0.664$, respectively. (a)–(d) Power spectra of Y-PC; (e)–(h) power spectra of X-PC

0.360, 0.430, 0.440, 0.520, 0.600, 0.664 时, 1550 nm-VCSEL 的 X-PC 和 Y-PC 输出的功率谱。当 ζ 分别为 0.120, 0.200, 0.360, 0.430 时, Y-OFC 的功率谱如图 6(a)~(d) 所示, 由图可知, 固定归一化电流和光电反馈时间, 在 $0.120 \leq \zeta \leq 0.430$ 范围内, Y-OFC 的功率谱随着光电反馈系数的增加变得越来越平坦, 当 ζ 增加到 0.430 时, Y-OFC 的功率谱出现无规则毛刺。当 ζ 分别为 0.440, 0.520, 0.600, 0.664 时, X-OFC 的功率谱如图 6(e)~(h) 所示。由图可知, 固定归一化电流和光电反馈时间, 在 $0.440 \leq \zeta \leq 0.664$ 范围内, X-OFC 的功率谱随着光电反馈系数的增加也变得越来越平坦, 当 ζ 增加到 0.664 时, X-OFC 的功率谱出现无规则毛刺。

最后, 为了突出本文的创新性和 OFC 的性能优势, 对近年来的相关重要研究成果进行比较, 见表 1。

表 1 近年来的相关重要研究成果比较

Table 1 Comparison of relevant important research results in recent years

Laser type	Center wavelength λ /nm	10 dB spectral width B_w /GHz
VCSEL ^[31]	1550	208
VCSEL ^[32]	1550	403
VCSEL ^[25]	1550	80
Tunable laser and VCSEL ^[26]	1550	80
Tunable laser and VCSEL ^[27]	850	105
Discrete mode laser ^[33]	1550	112

通过与近年来的相关重要研究成果进行比较,可知本文采用光电反馈作用下的 1550 nm-VCSEL 获得了在 10 dB 幅度范围内 Y-OFC 的光谱带宽超过 250 GHz 和 X-OFC 的光谱带宽超过 500 GHz 的双偏振光学频率梳,由此证明 1550 nm-VCSEL 在带宽方面具有显著优势。

4 结 论

采用一种基于光电反馈 1550 nm-VCSEL 产生宽带光学频率梳的方案,进一步根据方案中采用的系统结构示意图和光电反馈作用下 1550 nm-VCSEL 两个正交偏振模式的速率方程,利用四阶 Runge-Kutta 算法,数值仿真了光电反馈对 OFC 特性的影响。研究表明:固定归一化电流和光电反馈时间,增大光电反馈系数,可以获得 Y-OFC;继续增大光电反馈系数,偏振模式开始转换,可以获得 X-OFC。当 $\mu=5$ 、 $\tau=0.1$ ns 和 $\zeta=0.641$ 时,可同时获得 Y-OFC 和 X-OFC。光电反馈系数 ζ 在 0.120 至 0.664 范围内,随光电反馈系数的增加,Y-OFC 的光谱带宽从 95.67 GHz 增加到 250.86 GHz,X-OFC 的光谱带宽从 258.00 GHz 增加到 544.60 GHz,相应的功率谱随着光电反馈系数的增加而变得越来越平坦,但是过大的光电反馈系数会引入噪声,导致光谱中出现无规则毛刺。在合适的光电反馈参数条件下,可获取谱线平坦、梳线纯净、超宽带的线性偏振 OFC,在 10 dB 幅度范围内 Y-OFC 的光谱带宽超过 250 GHz,X-OFC 的光谱带宽超过 500 GHz。

参 考 文 献

- [1] Yasui T, Yokoyama S, Inaba H, et al. Terahertz frequency metrology based on frequency comb [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(1): 191-201.
- [2] Yokoyama S, Nakamura R, Nose M, et al. Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13052-13061.
- [3] Doloca N R, Meiners-Hagen K, Wedde M, et al. Absolute distance measurement system using a femtosecond laser as a modulator [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(11): 115302.
- [4] Zhao Y H, Qu X H, Zhang F M, et al. Theoretical analysis and application of absolute distance measurements based on electro-optic modulation and optical frequency comb [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1204002.
赵宇航, 曲兴华, 张福民, 等. 基于光电调制光频梳绝对测距的理论及实验分析 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1204002.
- [5] Diddams S A. The evolving optical frequency comb [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B51-B62.
- [6] Gao S, Gao Y, He S. Photonic generation of tunable multi-frequency microwave source [J]. Electronics Letters, 2010, 46(3): 236-237.
- [7] Xiao S, Hollberg L, Diddams S A. Low-noise synthesis of microwave and millimetre-wave signals with optical frequency comb generator [J]. Electronics Letters, 2009, 45(3): 170-171.
- [8] Yang X W, Xu K, Yin J, et al. Optical frequency comb based multi-band microwave frequency conversion for satellite applications [J]. Optics Express, 2014, 22(1): 869-877.
- [9] Quinlan F, Ozharar S, Gee S, et al. Harmonically mode-locked semiconductor-based lasers as high repetition rate ultralow noise pulse train and optical frequency comb sources [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(10): 103001.
- [10] Davila-Rodriguez J, Bagnell K, Delfyett P J. Frequency stability of a 10 GHz optical frequency comb from a semiconductor-based mode-locked laser with an intracavity 10,000 finesse etalon [J]. Optics Letters, 2013, 38(18): 3665-3668.
- [11] Leaird D E, Weiner A M, Seo D. Wideband flat optical frequency comb generated from a semiconductor based 10 GHz mode-locked laser with intra-cavity Fabry-Perot etalon [J]. Journal of IEEE, 2014, 18(1): 19-24.
- [12] He C, Pan S L, Guo R H, et al. Ultraflat optical frequency comb generated based on cascaded polarization modulators [J]. Optics Letters, 2012, 37

[1] Yasui T, Yokoyama S, Inaba H, et al. Terahertz

- (18): 3834-3836.
- [13] Ozharar S, Quinlan F, Ozdur I, et al. Ultraflat optical comb generation by phase-only modulation of continuous-wave light [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(1): 36-38.
- [14] Wang Q, Huo L, Xing Y F, et al. Ultra-flat optical frequency comb generator using a single-driven dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 3050-3053.
- [15] Xie H L, Jia K X, Chen J W, et al. Tunable optical frequency comb based on coupled radio frequency signal and single Mach-Zehnder modulator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0706002. 谢海伦, 贾可昕, 陈佳文, 等. 基于耦合射频信号和单个马赫-曾德尔调制器的可调光学频率梳[J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0706002.
- [16] Anandarajah P M, Maher R, Xu Y Q, et al. Generation of coherent multicarrier signals by gain switching of discrete mode lasers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(1): 112-122.
- [17] Zhu H T, Wang R, Pu T, 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.
- [18] Prior E, de Dios C, 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.
- [19] Rosado A, Pérez-Serrano A, Tijero J M G, et al. Experimental study of optical frequency comb generation in gain-switched semiconductor lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 542-550.
- [20] Koyama F. Recent advances of VCSEL photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4502-4513.
- [21] Iga K. Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 1201-1215.
- [22] 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.
- [23] Panajotov K. Polarization behavior of vertical-cavity surface-emitting lasers: experiments, models and applications[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2001, 560(1): 403-417.
- [24] Prior E, de Dios C, Criado R, et al. Dynamics of dual-polarization VCSEL-based optical frequency combs under optical injection locking [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4083-4086.
- [25] Quirce A, de Dios C, Valle A, 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): 1-9.
- [26] Li G Y, Yang W Y, Wu Z M, et al. Broadband optical frequency comb generation based on a current-modulated 1550 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 1550 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.
- [27] 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.
- [28] Wang Y L, Yang L H, Lin J R, et al. Absolute distance measurement based on coherent detection by femtosecond optical frequency comb[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0112003. 王一霖, 杨凌辉, 林嘉睿, 等. 基于飞秒光学频率梳相关探测的绝对测距[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0112003.
- [29] Liao J F, Sun J Q. Polarization dynamics and chaotic synchronization in unidirectionally coupled VCSELs subjected to optoelectronic feedback [J]. *Optics Communications*, 2013, 295: 188-196.
- [30] Torre M, Hurtado A, Quirce A, et al. Polarization switching in long-wavelength VCSELs subject to orthogonal optical injection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(1): 92-99.
- [31] Cano E P, de Dios Fernandez C, 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.
- [32] Prior E, de Dios C, Criado Á 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): 4135-4142.
- [33] Rosado A, Martín E P, Pérez-Serrano A, et al. Optical frequency comb generation via pulsed gain-switching in externally-injected semiconductor lasers using step-recovery diodes [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106392.

Generation of 500-GHz Broadband Dual-Polarization Optical Frequency Comb

Pang Haiyue¹, Li Zhaoyun^{1,2}, Li Huan¹, Tao Zhiyong¹, Fan Yaxian^{1*}

¹ Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing, School of Information Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

² The 34th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract

Objective Optical frequency combs (OFC) consist of a series of evenly spaced discrete spectral components that maintain high spectral coherence. It can be applied in many fields, such as metrology, spectroscopy, optical arbitrary waveform generation, THz generation, microwave photonics, and optical communications. Among the available optical comb technologies, OFC based on semiconductor lasers provides suitable combs with competitive costs and efficiency. Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is a single-longitudinal mode semiconductor laser. Compared with an edge emitter, VCSEL has some advantages, such as on-wafer test capability, lower energy consumption, lower manufacturing cost, and circular output beam. VCSEL can emit in two orthogonal linear polarization modes. Polarization switching between these modes can be found when changing the temperature or bias current applied to the VCSEL. These properties make them appropriate for OFC generation. Dual-polarization OFC-based VCSEL can be generated due to the special polarization properties. Further efforts are required to improve OFC-based on VCSEL, especially to expand the optical span while maintaining the existing advantages. In this study, we proposed a scheme for generating broadband dual-polarization OFC based on a 1550-nm VCSEL under optoelectronic feedback, opening perspectives for polarization-sensitive sensing and multicarriers optical sources for polarization-division multiplexing optical communications.

Methods We proposed and analyzed theoretically a scheme for generating a 500-GHz dual-polarization optical frequency comb based on a 1550-nm VCSEL under optoelectronic feedback. Besides, we numerically investigated the influences of optoelectronic feedback parameters on the performances of the generated optical frequency comb. The proposed model considered the optoelectronic feedback based on the rate equations of the spin-flip model of 1550-nm VCSEL. First, we proposed a schematic diagram of a broadband dual-polarization OFC generation based on a 1550-nm VCSEL under optoelectronic feedback. Then, we analyzed the output power versus normalized bias current curves of the two modes with orthogonal polarizations of the free-running 1550-nm VCSEL that is without optoelectronic feedback. After that, optoelectronic feedback effects on the polarization dynamics of 1550-nm VCSEL under different optoelectronic feedback parameters are theoretically investigated using the spin-flip model. In the next step, we analyzed the time series and optical spectra of the two linear polarization modes with orthogonal directions of 1550-nm VCSEL under a certain normalized bias current and optoelectronic feedback time with different optoelectronic feedback coefficient values. In addition, we analyzed the optical and power spectra of the two linear polarization mode outputs of 1550-nm VCSEL with different optoelectronic feedback coefficients.

Results and Discussions The results showed that two linear polarization modes with orthogonal directions of the 1550-nm VCSEL under optoelectronic feedback can be controlled by adjusting the optoelectronic feedback parameters. When the bias current or optoelectronic feedback parameters are changed under 1550-nm VCSEL, the polarization conversion of the Y- and X-polarization occurs (Fig. 3). Besides, we obtained that the dual-polarization optical frequency comb with Y- and X-polarization can be achieved under certain conditions of optoelectronic feedback parameters (Fig. 4). Within a certain range of optoelectronic feedback parameters, the optical spectral bandwidth of the Y- and X-polarization optical frequency comb increases with an increase in optoelectronic feedback coefficient (Fig. 5), and the corresponding power spectrum becomes flatter with an increase in optoelectronic feedback coefficient (Fig. 6). By adjusting the optoelectronic feedback coefficient and time, we obtained broadband dual-polarization optical frequency comb with flat spectral lines, pure comb lines. The spectral widths of the Y- and X-polarization optical frequency combs were more than 250 and 500 GHz within the amplitude range of 10 dB, respectively (Fig. 5).

Conclusions In this study, we proposed and analyzed theoretically a novel scheme for generating a 500-GHz dual-polarization optical frequency comb based on a 1550-nm VCSEL under optoelectronic feedback. It is shown that two orthogonal linear polarization optical frequency combs can be obtained and have comparable span and power under certain optoelectronic feedback conditions. The 10-dB spectral width of optical frequency combs of the *Y*- and *X*-polarization larger than 250 and 500 GHz can be achieved in the 1550-nm VCSEL subject to optoelectronic feedback under certain optoelectronic feedback parameter conditions, respectively. An appropriate increase in optoelectronic feedback coefficient in 1550-nm VCSEL can increase 10-dB spectral width. This increase is essential for enhancing the performance of OFCs generated by 1550-nm VCSEL under optoelectronic feedback for polarization-sensitive sensing and polarization-division multiplexing optical communications.

Key words laser optics; optical frequency comb; optoelectronic feedback; vertical cavity surface emitting laser; dual-polarization

OCIS codes 190.4360; 060.4510; 140.7260; 300.6170