

# 基于光注入下脉冲电流调制 1550 nm 垂直腔面发射激光器获取宽带可调谐光学频率梳\*

张竣琿<sup>1)2)</sup> 樊利<sup>3)</sup> 吴正茂<sup>1)2)</sup> 苟宸豪<sup>3)</sup> 骆阳<sup>3)</sup> 夏光琼<sup>1)2)†</sup>

1) (西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

2) (西南大学微纳结构光电子学重庆市重点实验室, 重庆 400715)

3) (西南大学电子信息工程学院, 重庆 400715)

(2022 年 8 月 30 日收到; 2022 年 9 月 25 日收到修改稿)

光学频率梳由一组等间距的离散频率成分组成, 在计量学、光谱学、太赫兹波产生、光通信、任意波形产生等领域有着广泛的应用. 本文提出了一种基于光注入下脉冲电流调制 1550 nm 垂直腔面发射激光器获取宽带可调谐光学频率梳的实验方案. 在该方案中, 首先采用脉冲信号电流调制激光器, 使其输出的光谱呈现出无明显梳状线的宽噪声谱; 进一步引入光注入, 获取宽带可调谐光学频率梳. 当注入功率为 18.82  $\mu\text{W}$ 、注入波长为 1551.8570 nm、调制电压为 10.5 V、调制频率为 0.5 GHz、脉冲宽度为 200 ps 时, 获取了带宽约为 82.5 GHz、信噪比约为 35 dB 的光学频率梳, 且该光学频率梳的单边带相位噪声低至  $-123.3 \text{ dBc}/\text{Hz}@10 \text{ kHz}$ . 此外, 本实验也系统研究了注入波长、调制频率、脉冲宽度对光学频率梳性能的影响. 实验结果表明: 改变调制频率可以获得不同梳距的光学频率梳, 当调制频率在 0.25—3 GHz 范围内, 选择优化的注入波长和脉冲宽度, 可获取带宽超过 60 GHz 的光学频率梳.

**关键词:** 光学频率梳, 垂直腔面发射激光器, 电流调制, 光注入

**PACS:** 42.65.-k, 42.55.Px, 42.60.Fc

**DOI:** 10.7498/aps.72.20221709

## 1 引言

光学频率梳 (optical frequency comb, OFC) 由一组等间距的离散频率成分组成<sup>[1]</sup>. 由于具有稳定性良好、频率间隔均匀、相干性高等优点, OFC 被广泛应用于计量学<sup>[2,3]</sup>、任意波形产生<sup>[4,5]</sup>、光谱学<sup>[6,7]</sup>、光通信<sup>[8,9]</sup>、太赫兹波产生<sup>[10,11]</sup> 等领域. 目前, 获取 OFC 的方式主要有锁模<sup>[12,13]</sup>、外部调制<sup>[14,15]</sup>、电流调制<sup>[16–19]</sup> 等. 其中, 基于电流调制半导体激光器获取 OFC 实验系统简单, 易于操作, 并且能够获取梳线间距灵活可调、稳定性良好的 OFC, 因此, 基于电流调制半导体激光器获取 OFC 倍受青睐.

垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 是一种典型的半导体激光器, 具有制造成本低、阈值电流低、光纤耦合效率高、易于集成等特点, 在很多领域有着广泛应用<sup>[20,21]</sup>. 尤其是 VCSEL 的增益有源区或激光腔中存在微弱的各向异性, 从而导致其输出包含两个正交的偏振分量<sup>[22,23]</sup>, 在一定条件下可同时输出两个偏振方向正交的 OFC, 为偏振敏感传感<sup>[24]</sup> 和偏振分频复用光通信<sup>[25]</sup> 的多载波光源提供了应用前景. 目前, 基于电流调制 VCSEL 获取 OFC 已有相关理论和实验的研究报道. 2015 年, Prior 等<sup>[26]</sup> 实验证明了电流调制 VCSEL 可以同时输出两个偏振方向正交的 OFC, 并可叠加为一个宽带 OFC. 次年, 该课

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61775184, 61875167) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

课题组<sup>[27]</sup>在系统中进一步引入光注入提升 OFC 的带宽. 2018 年, Quirce 等<sup>[28]</sup>理论研究了电流调制 VCSEL 产生 OFC 的性能. 同年, 该课题组<sup>[29]</sup>在系统中引入光注入, 进一步理论研究注入光的功率、位置、偏振对 OFC 性能的影响. 2020 年, 本课题组<sup>[30]</sup>实验研究了注入功率和波长对光注入电流调制 VCSEL 产生 OFC 性能的影响, 实验获取了带宽约为 70 GHz 的 OFC. 需要指出的是, 上述基于电流调制 VCSEL 获取 OFC 的方案中, 都采用了正弦信号进行电流调制, 但正弦信号因其单一的频率成分无法在较低的调制频率 ( $\leq 1$  GHz) 下获取平坦且宽带的 OFC<sup>[31]</sup>. 2019 年, Rosado 等采用脉冲信号对光注入下离散模式激光器进行调制, 当调制频率为 0.5 GHz 时, 获取了带宽约为 54 GHz, 载噪比 (carrier to noise ratio, CNR) 为 37 dB 的 OFC<sup>[32]</sup>. 但目前, 基于光注入下脉冲电流调制 VCSEL 获取 OFC, 以及调制参数对 OFC 性能影响的研究尚未见报道.

因此, 本文提出一种基于光注入下脉冲电流调制 1550 nm-VCSEL 获取宽带可调谐 OFC 的实验方案. 主要研究注入波长、调制频率、脉冲宽度对 OFC 带宽和 CNR 的影响. 实验结果表明, 注入波长、调制频率、脉冲宽度对 OFC 性能有显著影响,

在不同调制频率和匹配的注入波长下, 优化脉冲宽度, 可获得宽带可调谐的 OFC.

## 2 实验系统

图 1 是实验系统结构示意图. 可调谐激光器 (TL, Santec TSL-710) 输出的光通过可变衰减器 (VA)、偏振控制器 (PC)、20/80 光纤耦合器 (FC1) 后被分成两部分, 其中 20% 进入光功率计 (PM) 监测注入功率的大小, 80% 通过光环行器 (OC) 后注入到 1550 nm-VCSEL (Raycan) 中. VCSEL 的温度和偏置电流 ( $I_{\text{bias}}$ ) 由高精度低噪声电流-温度控制器 (ILX-Lightwave, LDC-3908) 控制, 且一个任意波形发生器 (AWG, Tektronix, AWG70001A, 1.5 KSa/s—50 GSa/s) 产生的高斯脉冲电信号通过电放大器 (EA) 放大后对 VCSEL 进行调制. VCSEL 的输出通过 OC、光纤起偏器 (OFP, Opeak-OM-POL-GN)、掺铒光纤放大器 (EDFA)、50/50 光纤耦合器 (FC2) 后被分成两个部分, 其中一部分进入光谱分析仪 (OSA, Aragon Photonics BOSA lite +, 分辨率为 20 MHz) 进行光谱测定; 另一部分被一个 50/50 光纤耦合器 (FC3) 再分为两部分, 一部分进入光电探测器 (PD1, U2T-XPDV2150R,

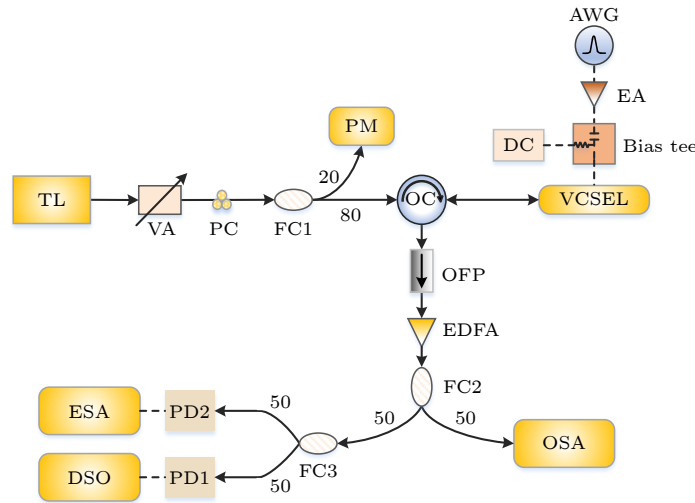


图 1 实验系统结构图. TL - 可调谐激光器; VA - 可变衰减器; PC - 偏振控制器; FC - 光纤耦合器; PM - 光功率计; OC - 光环行器; AWG - 任意波形发生器; EA - 电放大器; DC - 直流电源; VCSEL - 垂直腔面发射激光器; OFP - 光纤起偏器; EDFA - 掺铒光纤放大器; PD - 光电探测器; ESA - 频谱分析仪; DSO - 数字实时示波器; OSA - 光谱分析仪. 实线-光路; 虚线-电路

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system: TL - tunable laser; VA - variable attenuator; PC - polarization controller; FC - fiber coupler; PM - power meter; OC - optical circulator; AWG - arbitrary waveform generator; EA - electric amplifier; DC - direct current; VCSEL - vertical-cavity surface-emitting laser; OFP - optical fiber polarizer; EDFA - erbium-doped fiber amplifier; PD - photo-detector; ESA - spectrum analyzer; DSO - digital storage oscilloscope; OSA - optical spectrum analyzer. Solid line - optical path; dashed line - electronic path.

带宽为 50 GHz) 转换成电信号, 然后用频谱分析仪 (ESA, R&S FSW, 带宽为 67.0 GHz) 进行频谱分析; 另一部分进入另一个光电探测器 (PD2, New Focus 1544B, 带宽为 12.0 GHz) 转换成电信号, 然后由数字实时示波器 (DSO, Agilent X91604A, 带宽为 16.0 GHz) 记录时间序列. 其中 VA 用于调节注入功率  $P_i$  的大小, PC 用于调节注入光的偏振, OFP 用于选择 VCSEL 输出光的偏振方向, EDFA 用于放大光功率. 在实验过程中, 1550 nm-VCSEL 的温度保持在 20.10 °C.

### 3 实验结果与讨论

图 2(a) 是自由运行 1550 nm-VCSEL 的输出功率随电流的变化曲线 ( $P$ - $I$  曲线), 图中  $Y$  偏振分量 ( $Y$  polarization component,  $Y$ -PC) 和  $X$  偏振分量 ( $X$  polarization component,  $X$ -PC) 分别用实线和点线表示. 从图 2(a) 中可知, VCSEL 的阈值电流  $I_{th}$  约为 1.7 mA, 偏振开关电流约为 6.6 mA. 当  $I_{bias}$  超过  $I_{th}$  时,  $Y$ -PC 激励,  $X$ -PC 被抑制; 当  $I_{bias}$  高于 6.6 mA, 激励的偏振分量切换为  $X$ -PC, 此时  $X$ -PC 激励, 而  $Y$ -PC 被抑制. 图 2(b) 和 (c) 分别显示了  $I_{bias} = 6.4$  mA 和  $I_{bias} = 6.8$  mA 时, 自由运行 VCSEL 输出的光谱. 图 2(b) 中, 光谱在 1552.612 nm 和 1552.870 nm 处出现两个峰, 分别对应  $Y$ -PC 和  $X$ -PC, 且  $Y$ -PC 功率远高于  $X$ -PC, 此时  $Y$ -PC 为主激励的偏振分量; 图 2(c) 中  $X$ -PC 功率明显高于  $Y$ -PC,  $X$ -PC 为主激励的偏振分量. 两个偏振分量波长 (频率) 间隔约为 0.258 nm (32.2 GHz). 需要说明的是, 在后续实验中使用正向脉冲电信号 (调制电压  $V_m = 10.5$  V) 调制 1550 nm-VCSEL, 为了实现增益开关, 实验中设

置  $I_{bias} = 1.5$  mA, 略低于 VCSEL 的  $I_{th}$ .

首先, 研究在特定调制参数和注入参数下 1550 nm-VCSEL 的输出特性. 图 3(a1) 给出了由 AWG 产生经过 EA 放大后对 1550 nm-VCSEL 进行脉冲电流调制的波形. 此时, 脉冲的调制频率  $f_m = 0.5$  GHz、峰值电压为  $V_m = 10.5$  V. 为了更清晰地显示脉冲形状, 图 3(a2) 给出了一个周期 (2 ns) 的脉冲波形. 在本文中, 我们采用半极大全宽表征调制脉冲信号宽度 ( $\tau_{elec}$ ), 此时  $\tau_{elec} = 200$  ps. 图 3(b1) 和 (b2) 分别是在图 3(a1) 所示的脉冲电流调制下 1550 nm-VCSEL 输出的时间序列和光谱. 从图中可以看出, 其时间序列为等间隔、峰值功率随机变化的脉冲, 脉冲间隔为 2 ns ( $= 1/f_m$ ). 光谱为无明显梳状线的宽噪声谱, 且噪声谱宽度与自由运行 1550 nm-VCSEL 的两个偏振分量波长间隔相关<sup>[29]</sup>. 这样的光谱结构是因为每一个脉冲的建立都是源于自发辐射, 后续脉冲与前序脉冲之间无固定的相位关系<sup>[33]</sup>. 进一步引入光注入, 当注入波长  $\lambda_i = 1551.8570$  nm, 注入功率  $P_i = 18.82$   $\mu$ W 时, 1550 nm-VCSEL 输出的时间序列和光谱如图 3(c1) 和 3(c2) 所示. 引入光注入后, 输出时间序列仍为等间隔的脉冲, 但此时脉冲的峰值功率稳定. 在本文中, OFC 的性能通过带宽和载噪比 (CNR) 来表征. 其中, 带宽定义为从光谱的最大值下降 10 dB 所包含的频率范围, 而 CNR 定义为光谱梳状线功率 (以 dB 为单位) 的最大值与相邻的最小值之差<sup>[29]</sup>. 根据上述定义, 此时引入光注入后可产生宽带 OFC, 带宽约为 82.5 GHz (166 根梳状线), CNR 约为 35 dB. 光注入使每一个脉冲的建立主要源于注入光场, 从而使前后脉冲之间具有相位关联性, 使 1550 nm-VCSEL 输出优质的 OFC<sup>[33]</sup>.

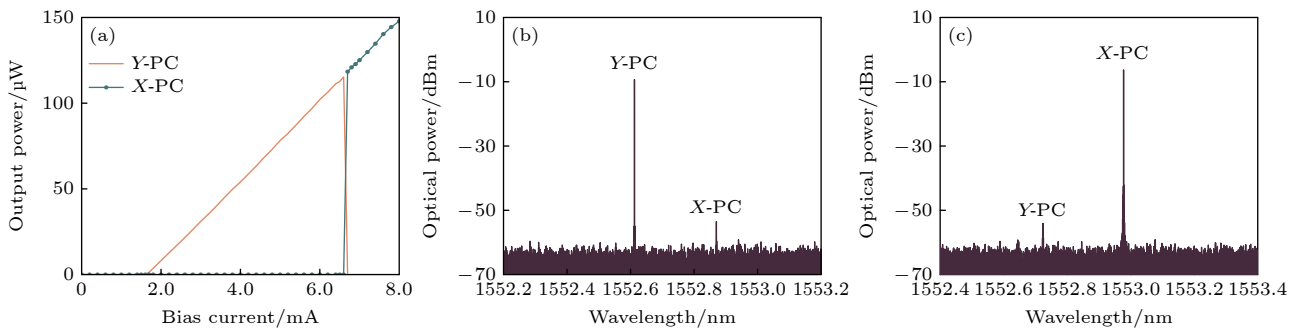


图 2 (a) 自由运行 1550 nm-VCSEL 输出的偏振分解  $P$ - $I$  曲线; (b)  $I_{bias} = 6.4$  mA 时的光谱; (c)  $I_{bias} = 6.8$  mA 时的光谱

Fig. 2. (a) Polarization-resolved  $P$ - $I$  curve; (b) optical spectrum of the free-running 1550 nm-VCSEL biased at 6.4 mA; (c) optical spectrum of the free-running 1550 nm-VCSEL biased at 6.8 mA.

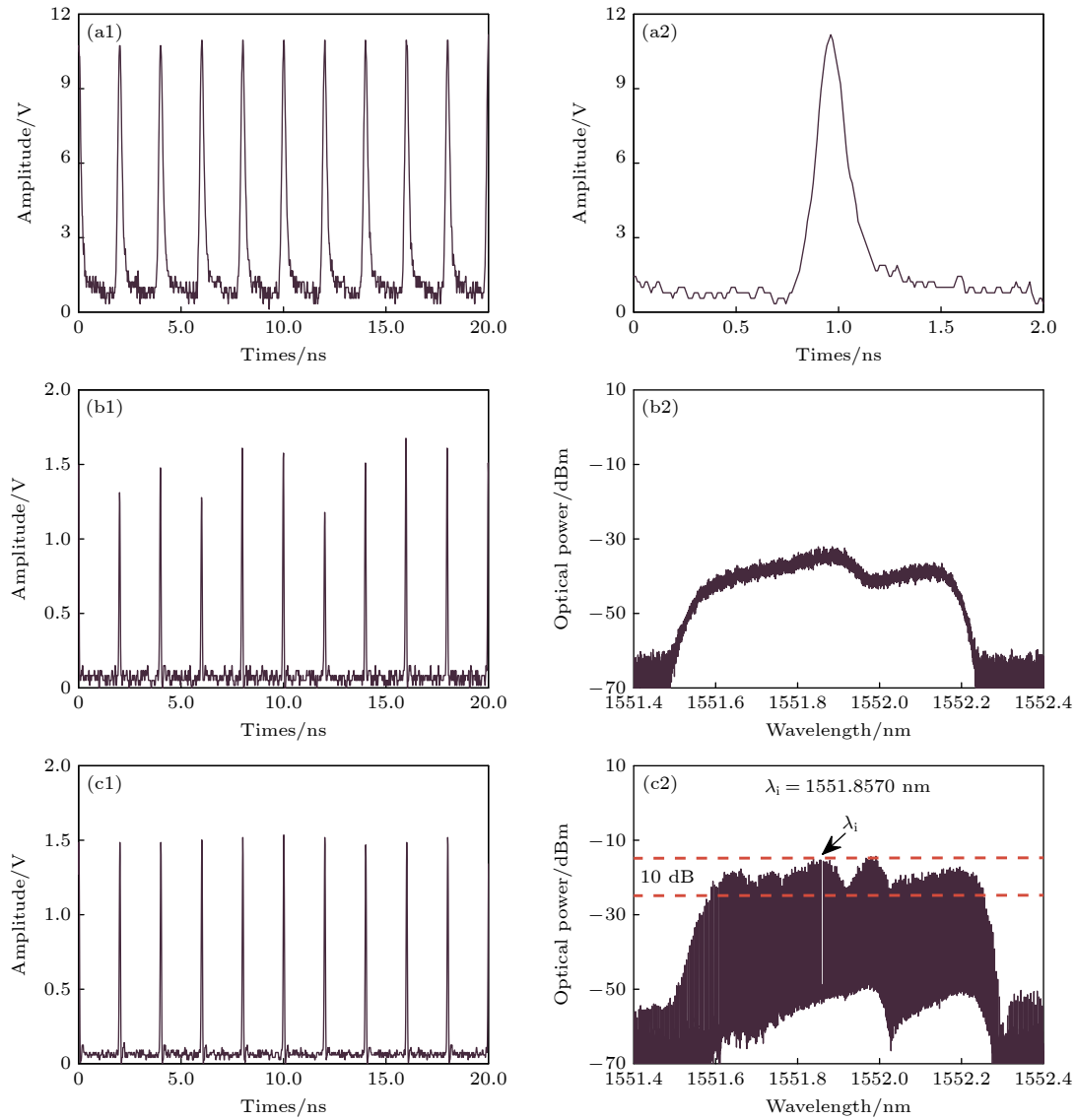


图 3 AWG 产生的脉冲调制信号在不同时间窗口的波形 (a1)—(a2), 脉冲电流调制下的 VCSEL 输出的时间序列 (b1) 和光谱 (b2), 以及进一步引入光注入 ( $\lambda_i = 1551.8570$  nm,  $P_i = 18.82$   $\mu$ W) 后 VCSEL 输出的时间序列 (c1) 和光谱 (c2)

Fig. 3. Pulsed waveforms in different time windows generated by AWG (a1)—(a2), time series (b1) and optical spectrum (b2) of pulsed current-modulated VCSEL, time series (c1) and optical spectrum (c2) of pulsed current-modulated VCSEL under optical injection with  $P_i = 18.82$   $\mu$ W and  $\lambda_i = 1551.8570$ .

图 4 显示光注入下脉冲电流调制 1550 nm-VCSEL 输出 OFC 的带宽和 CNR 随注入波长的变化趋势. 其中注入波长的变化步长设置为 0.02 nm. 由图 4(a) 可知, 当  $\lambda_i < 1551.5770$  nm 或  $\lambda_i > 1552.2770$  nm 时, 注入波长在噪声谱外, 不能产生 OFC; 当  $1551.5770$  nm  $\leq \lambda_i \leq 1552.2770$  nm, 可以获得宽带的 OFC, OFC 带宽超过 38 GHz. 特别是当注入波长在  $1551.8470$  nm  $\leq \lambda_i \leq 1551.8670$  nm 之间时, Y-PC 和 X-PC 周围均激发出功率均衡的梳状线, 此外可以获得带宽达 82.5 GHz 的宽带 OFC. 在图 4(b) 中, 随着注入波

长的增大, CNR 从 0 dB 开始, 先增大, 然后稳定在较高的水平, 然后减小. 这是因为当注入波长在噪声谱外, VCSEL 不能输出梳状线, 此时 CNR 为 0 dB. 当注入波长在噪声谱两端时, 光注入激发 VCSEL 输出梳状线, 但此时 OFC 的功率较小, CNR 较低. 当注入波长在  $1551.6770$  nm  $< \lambda_i < 1552.1570$  nm 时, 注入波长在噪声谱的中心区域附近, 此时噪声谱被有效抑制, VCSEL 输出功率均衡的 OFC, 此时 CNR 保持在较高的水平, 在 33—36 dB 之间波动. 因此, 实验结果表明: 注入波长是影响 OFC 性能的一个重要因素, 这是因为注

入波长的变化会导致 VCSEL 中两个偏振分量的相对强弱的改变<sup>[30]</sup>. 因此, 选择合适的注入波长, 可以获得大带宽、高 CNR 的 OFC.

高质量的 OFC 除了具有大带宽和高 CNR 外, 还应具有高度相干和稳定的梳状线. 图 5 显示中心频率为 0.5 GHz ( $= f_m$ ) 的电信号的功率谱 (图 5(a)) 和单边带 (single sideband, SSB) 相位噪声 (图 5(b)). 如图所示, 该信号的 3 dB 线宽低于 1 Hz (图 5(a)), SSB 相位噪声约为  $-123.3$  dBc/Hz @ 10 kHz (图 5(b)). 这表明基于光注入下脉冲电流调制 1550 nm-VCSEL 能够输出高度相干和稳定的梳状线.

接下来研究调制频率对 OFC 性能的影响. 图 6 是  $P_i = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $\tau_{\text{elec}} = 125$  ps 时, 光注入脉冲电流调制 VCSEL 在不同  $f_m$  下输出的光谱. 需要注意的是, 调制频率的变化会引起噪声谱包络的移动<sup>[30]</sup>, 因此需要选择匹配的注入波长, 使光注入电流调制 VCSEL 输出 OFC. 如图 6(a) 所示,  $f_m = 0.25$  GHz,

$\lambda_i = 1551.3087$  nm 时, X-PC 和 Y-PC 偏振分量产生的 OFC 相互分离, 此时 OFC 带宽较小, 带宽约为 39 GHz (157 根梳状线), CNR 约为 31 dB. 如图 6(b)—(e) 所示, 当  $f_m$  为 0.5 GHz, 0.75 GHz, 1.5 GHz, 2.0 GHz 时, 对应的  $\lambda_i = 1551.7495$  nm, 1551.8053 nm, 1552.5577 nm, 1551.7470 nm 时, X-PC 和 Y-PC 产生的梳状线可以连接成宽带 OFC, 带宽约为 73.0 GHz (147 根梳状线)、69 GHz (93 根梳状线)、57.0 GHz (39 根梳状线)、54 GHz (28 根梳状线); CNR 约为 35 dB, 38 dB, 43 dB, 45 dB. 进一步增大调制频率, 当  $f_m = 3.0$  GHz,  $\lambda_i = 1552.1287$  nm 时, 如图 6(f) 所示, 过高的调制频率使 OFC 功率不均匀, 带宽降低至 15.0 GHz (6 根梳状线), CNR 约为 47 dB.

图 7 给出了 OFC 带宽和 CNR 随  $f_m$  增大的变化趋势. 在图 7(a) 中, 随着  $f_m$  的增大, OFC 的带宽呈现先增大后减小的变化趋势. 当  $0.25 \text{ GHz} < f_m \leq 2.5 \text{ GHz}$  时, 两个偏振分量输出的梳状线功

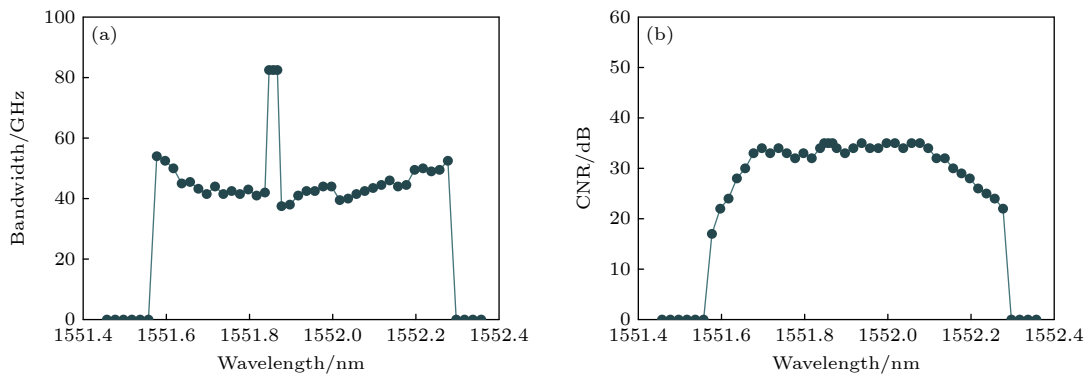


图 4  $P_i = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5$  V,  $f_m = 0.5$  GHz,  $\tau_{\text{elec}} = 200$  ps 时, 随着  $\lambda_i$  增大, 光注入下脉冲电流调制 VCSEL 输出 OFC 带宽 (a) 和 CNR (b) 的变化趋势.

Fig. 4. Evolution of the bandwidth (a) and CNR (b) as a function of the injection light wavelength for the pulsed current modulation VCSEL at  $P_i = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5$  V,  $f_m = 0.5$  GHz,  $\tau_{\text{elec}} = 200$  ps.

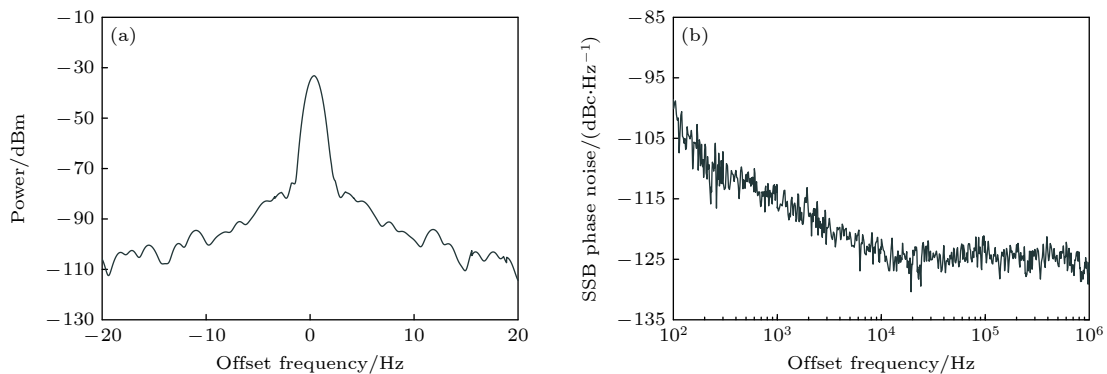


图 5 中心频率为 0.5 GHz 电信号的功率谱 (a) 和单边带相位噪声 (b), 其中 ESA 的分辨率为 1 Hz

Fig. 5. Power spectrum (a) and SSB phase noise (b) centered at 0.5 GHz under a resolution bandwidth of 1 Hz.

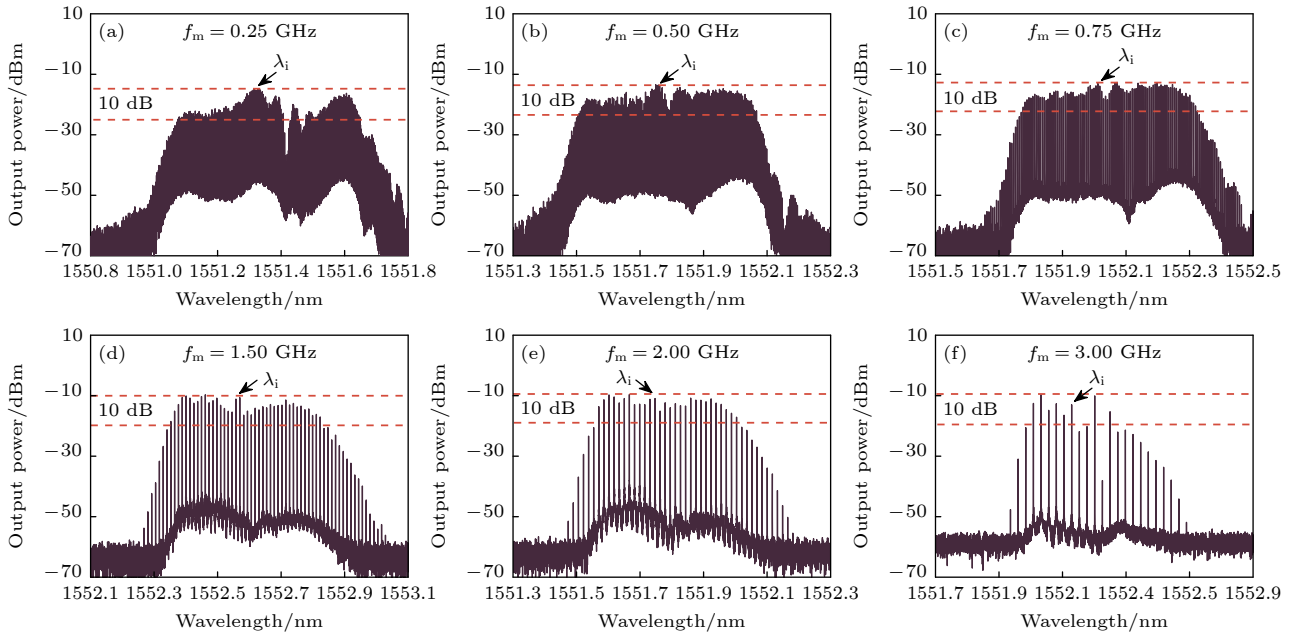


图 6 当  $P_i = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$ ,  $\tau_{\text{elec}} = 125 \text{ ps}$  时, 光注入脉冲电流调制 VCSEL 在不同  $f_m$  下输出的光谱

Fig. 6. Output from the VCSEL under optical injection and pulse current modulation with  $P_i = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$ ,  $\tau_{\text{elec}} = 125 \text{ ps}$  and different  $f_m$ .

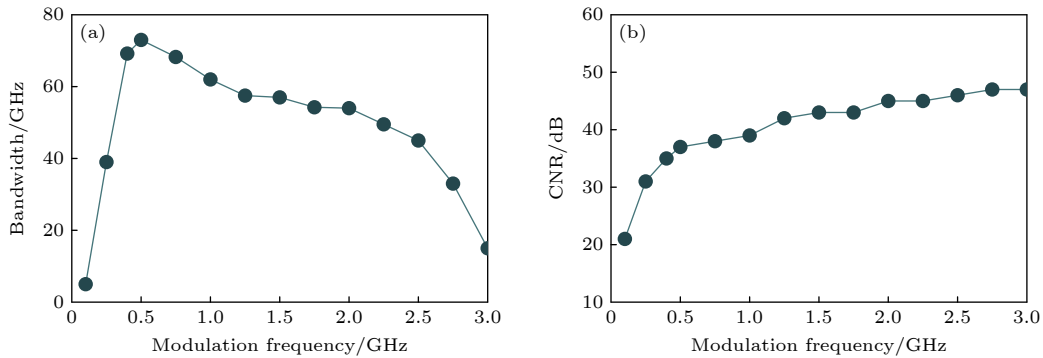


图 7 当  $P_i = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$ ,  $\tau_{\text{elec}} = 125 \text{ ps}$  时, 光注入脉冲电流调制 VCSEL 随着  $f_m$  的增大, 输出 OFC 带宽 (a) 和 CNR (b) 的变化趋势.

Fig. 7. Evolution of the bandwidth (a) and CNR (b) as a function of the pulsed modulation frequency at  $P_i = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$ ,  $\tau_{\text{elec}} = 125 \text{ ps}$ .

率比较均衡, 连接成宽带 OFC, OFC 带宽在 40 GHz 以上. 在图 7(b) 中, 随着  $f_m$  的增大, CNR 呈现先快速上升, 再趋于平缓的趋势. 当  $0.25 \text{ GHz} < f_m$  时, 均可获得高 CNR 的 OFC, CNR 大于 35 dB.

研究  $\tau_{\text{elec}}$  对 OFC 带宽和 CNR 的影响. 图 8 给出了 OFC 带宽和 CNR 随  $\tau_{\text{elec}}$  增大的变化趋势. 如图 8(a) 所示, 随着  $\tau_{\text{elec}}$  的增大, OFC 带宽呈现先增大后减小的变化趋势. 当  $\tau_{\text{elec}} < 62.5 \text{ ps}$  时, 较小的调制脉宽不能提供足够的调制能量, 此时两个偏振分量产生的梳状线功率差距较大, VCSEL 不能输出平坦且宽带的 OFC. 当  $62.5 \text{ ps} \leq \tau_{\text{elec}} \leq 250 \text{ ps}$ , 适当的调制脉宽和调制能量使得 VCSEL

输出功率均衡的宽带 OFC, OFC 带宽在 48 GHz 以上. 特别是在  $175 \text{ ps} \leq \tau_{\text{elec}} \leq 250 \text{ ps}$  的脉宽范围内, OFC 带宽可以超过 80 GHz. 继续增大  $\tau_{\text{elec}}$ , 当  $\tau_{\text{elec}} > 250 \text{ ps}$  时, 较大的调制脉宽带来了较多的调制能量, 这些较强的调制能量很难均匀分布在 OFC 的各个梳状线上, 这导致 OFC 的梳状线不均衡, 带宽逐渐减少. 如图 8(b) 所示,  $\tau_{\text{elec}}$  的变化对 CNR 的影响较小, CNR 在 35—38 dB 之间波动. 因此, 实验结果表明,  $\tau_{\text{elec}}$  的变化对 OFC 的带宽影响较大, 对 CNR 的影响较小. 选择合适的  $\tau_{\text{elec}}$ , 可以获得宽带、高 CNR 的 OFC.

上文研究了固定  $\tau_{\text{elec}} = 125 \text{ ps}$ , 不同  $f_m$  下, 光

注入脉冲电流调制 VCSEL 输出 OFC 的性能. 事实上, 通过优化  $\tau_{\text{elec}}$ , 可以进一步提升不同  $f_m$  下的 OFC 带宽. 图 9 显示  $P_1 = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$  时, 光注入脉冲电流调制 VCSEL 在不同  $f_m$  下, 选择优化的  $\tau_{\text{elec}}$  时输出的光谱. 需要注意的是: 图 9 中的 OFC, 同样需要选择匹配的注入波长. 在图 9(a)—(f) 中, 当  $(f_m, \lambda_i) = (0.25 \text{ GHz}, 1551.8037 \text{ nm}), (0.5 \text{ GHz}, 1551.8570 \text{ nm}), (0.75 \text{ GHz}, 1552.4902 \text{ nm}), (1.5 \text{ GHz}, 1553.7906 \text{ nm}), (2.0 \text{ GHz}, 1553.9384 \text{ nm}), (3.0 \text{ GHz}, 1553.0364 \text{ nm})$  时, 选择优化的  $\tau_{\text{elec}}$  为 100 ps, 200 ps, 150 ps, 175 ps, 200 ps, 162.5 ps 时, 获取的 OFC 带宽分别为 72.25 GHz (289 根梳

状线)、82.5 GHz (166 根梳状线)、74.25 GHz (100 根梳状线)、70.5 GHz (48 根梳状线)、64.0 GHz (33 根梳状线)、63.0 GHz (22 根梳状线), CNR 分别为 31 dB, 35 dB, 38 dB, 45 dB, 47 dB, 49 dB. 将以上实验结果和图 6 进行对比可以发现, 相同的调制频率, 优化脉冲宽度, OFC 带宽分别增大了 32.75 GHz, 9.5 GHz, 5.25 GHz, 13.5 GHz, 10 GHz, 48 GHz. 因此, 在不同的  $f_m$  下, 通过优化的  $\tau_{\text{elec}}$ , 可以通过本文提出的实验系统获取宽带可调谐 OFC. 另外, 实验结果还表明: 在优化的参数条件下所获得的 OFC 比较稳定, 梳线功率抖动较小 (小于 1 dB).

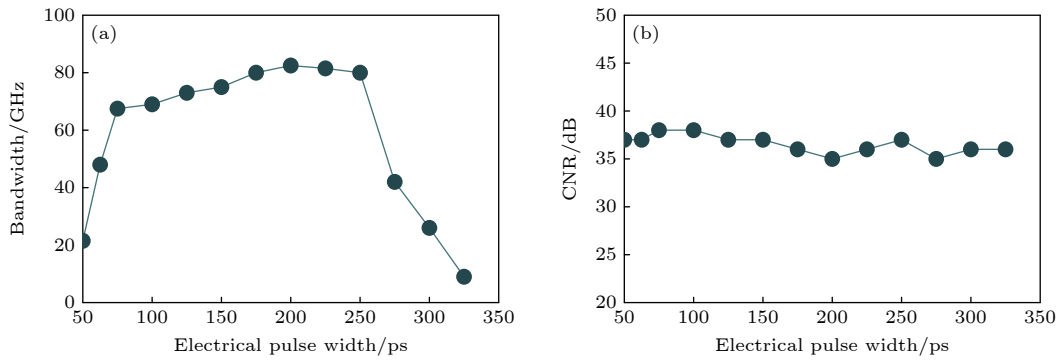


图 8 当  $P_1 = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$ ,  $f_m = 0.5 \text{ GHz}$  时, 光注入脉冲电流调制 VCSEL 随着  $\tau_{\text{elec}}$  的增大, 输出 OFC 带宽 (a) 和 CNR (b) 的变化趋势.

Fig. 8. Evolution of the bandwidth (a) and CNR (b) as a function of the pulse width at  $P_1 = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$ ,  $f_m = 0.5 \text{ GHz}$ .

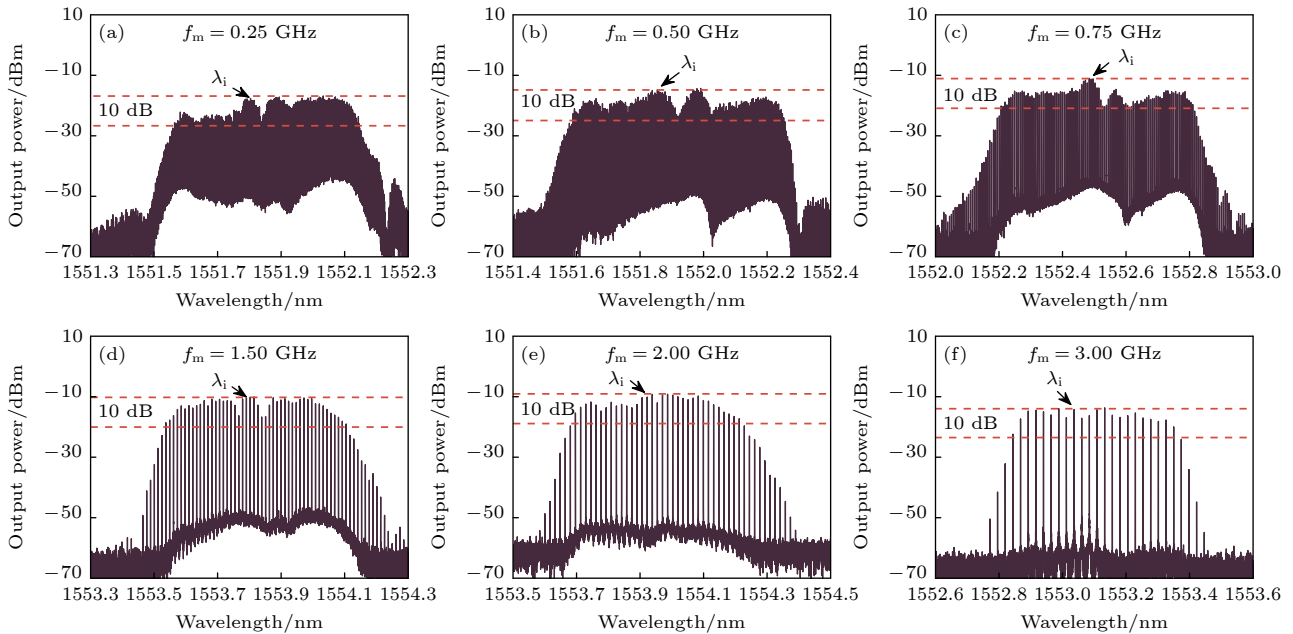


图 9 当  $P_1 = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$  时, 光注入脉冲电流调制 VCSEL 在不同  $f_m$  下, 选择优化的  $\tau_{\text{elec}}$  时输出的光谱

Fig. 9. Output from the VCSEL under optical injection and pulse current modulation with optimized  $\tau_{\text{elec}}$  and  $P_1 = 18.82 \mu\text{W}$ ,  $V_m = 10.5 \text{ V}$  at different  $f_m$ .

## 4 结 论

本文提出了一种基于光注入下脉冲电流调制 1550 nm-VCSEL 获取宽带可调谐 OFC 的实验方案. 在该方案中, 采用脉冲信号调制激光器, 使其输出的光谱呈现无明显梳状线的宽噪声谱; 进一步引入光注入获取宽带可调谐 OFC. 在调制频率  $f_m = 0.5$  GHz, 脉冲宽度  $\tau_{\text{elec}} = 200$  ps, 注入波长  $\lambda_i = 1551.8570$  nm 时, 获取带宽约为 82.5 GHz, CNR 约为 35 dB 的宽带 OFC, 对应的 SSB 相位噪声低至  $-123.3$  dBc/Hz @ 10 kHz. 并且, 我们系统地研究了注入波长, 调制频率, 脉冲宽度对 OFC 性能的影响. 实验结果表明, 给定调制频率和脉冲宽度, 注入波长在  $1551.8470$  nm  $\leq \lambda_i \leq 1551.8670$  nm 之间时, 可以获得带宽达 82.5 GHz, CNR 为 35 dB 的宽带 OFC. 给定脉冲宽度和适当的注入波长, 调制频率当  $0.25$  GHz  $< f_m \leq 2.5$  GHz 时, OFC 带宽在 40 GHz 以上, CNR 在 35 dB 以上. 给定调制频率和适当的注入波长, 脉冲宽度在  $175$  ps  $\leq \tau_{\text{elec}} \leq 250$  ps 的脉宽范围内, 可以获得带宽超过 80 GHz 的 OFC, CNR 在 35 dB 以上.

## 参考文献

- [1] Parriaux A, Hammani K, Millot G 2020 *Adv. Opt. Photonics* **12** 223
- [2] Diddams S, Vahala K, Udem T 2020 *Science* **369** 267
- [3] Yan X L, Zou X H, Pan W, Yan L S, Azaña J 2018 *Opt. Lett.* **43** 283
- [4] Cundiff S T, Weiner A M, Andrew M 2010 *Nat. Photon.* **4** 760
- [5] Li P L, Ma X L, Shi W H, Xu E M 2017 *Opt. Laser Technol.* **94** 228
- [6] Cingöz A, Yost D C, Allison T K, Ruehl A, Fermann M E, Hartl I, Ye J 2012 *Nature* **482** 68
- [7] Sadiq I, Mikkonen T, Vainio M, Toivonen J, Foltynowicz A 2018 *Phys. Chem.* **20** 27849
- [8] He J, Long F T, Deng R, Shi J, Dai M, Chen L 2017 *J. Opt. Commun.* **9** 393
- [9] Tan J, Zhao Z P, Wang Y H, Zhang Z K, Liu J G, Zhu N H 2018 *Opt. Express* **26** 2099
- [10] Ponnampalam L, Fice M, Shams H, Renaud C, Seeds A 2018 *Opt. Lett.* **43** 2507
- [11] Yu J G, Li K L, Chen Y X, Zhao L, Huang Y T, Li Y T, Ma J, Shan F L 2020 *IEEE Photonics J.* **12** 7900808
- [12] Davila-Rodriguez J, Bagnell K, Delfyett P J 2013 *Opt. Lett.* **38** 3665
- [13] Hou L, Huang Y, Liu Y, Zhang R, Wang J, Wang B, Zhu H, Hou B, Qiu B, Marsh J H 2020 *Opt. Lett.* **45** 2760
- [14] He C, Pan S, Guo R, Zhao Y, Pan M 2012 *Opt. Lett.* **37** 3834
- [15] Li D, Wu S B, Liu Y, Guo Y F 2020 *Appl. Opt.* **59** 1916
- [16] Qu K, Zhao S H, Li X, Tan Q G, Zhu Z H 2018 *Opt. Rev.* **25** 264
- [17] Wang Z F, Ma M, Sun H, Khalil M, Adams R, Yim K, Jin X, Chen L R 2019 *IEEE J. Quantum Electron.* **55** 8400206
- [18] Pascual M D G, Zhou R, Smyth F, Anandarajah P M, Barry L P 2015 *Opt. Express* **23** 23225
- [19] Zhu H T, Wang R, Pu T, Xiang P, Zheng J L, Fang T 2016 *Laser Phys. Lett.* **14** 026201
- [20] Guo X X, Xiang S Y, Zhang Y H, Hao Y 2021 *Acta Photon. Sin.* **50** 1020002 (in Chinese) [郭星星, 项水英, 张雅慧, 郝跃 2021 光子学报 **50** 1020002]
- [21] Zhong D Z, Zeng N, Yang H, Xu Z 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 074206 (in Chinese) [钟东洲, 曾能, 杨华, 徐喆 2021 物理学报 **70** 074206]
- [22] Wang X F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 104208 (in Chinese) [王小发 2013 物理学报 **62** 104208]
- [23] Chen J J, Zhong Z Q, Li L F 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 0714003 (in Chinese) [陈建军, 钟祝强, 李林福 2022 光学学报 **42** 0714003]
- [24] Xie C, Spiga S, Dong P, Winzer P, Bergmann M, KoGel B, Neumeyr C, Amann M C 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 670
- [25] Wang Z, Lee H C, Ahsen O O, Lee B K, Choi W J, Potsaid B, Liu J, Jayaraman V, Cable A, Kraus M F 2014 *Biomed. Opt. Express* **5** 2931
- [26] Prior E, De Dios C, Ortsiefer M, Meissner P, Acedo P 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 4572
- [27] Prior E, De Dios C, Criado R, Ortsiefer M, Meissner P, Acedo P 2016 *Opt. Lett.* **41** 4083
- [28] Quirce A, De Dios C, Valle A, Pesquera L, Acedo P 2018 *J. Lightwave Technol.* **36** 1798
- [29] Quirce A, De Dios C, Valle A, Acedo P 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25** 2888560
- [30] Ren H P, Fan L, Liu N, Wu Z M, Xia G Q 2020 *Photonics* **7** 95
- [31] Rosado A, Martin E P, Perez-Serrano A, Tijero J, Anandarajah P M 2020 *Opt. Laser Technol.* **131** 106392
- [32] Rosado A, Pérez-Serrano A, Tijero J M G, Valle Á, Pesquera L, Esquivias I 2019 *Opt. Express* **27** 9155
- [33] Rosado A, Pérez-Serrano A, Tijero J M G, Gutierrez A V, Pesquera L, Esquivias I 2019 *IEEE J. Quantum Electron.* **55** 2001012

# Broadband and tunable optical frequency comb based on 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser under pulsed current modulation and optical injection\*

Zhang Jun-Hui<sup>1)2)</sup> Fan Li<sup>3)</sup> Wu Zheng-Mao<sup>1)2)</sup> Gou Chen-Hao<sup>3)</sup>  
Luo Yang<sup>3)</sup> Xia Guang-Qiong<sup>1)2)†</sup>

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

2) (*Chongqing Key Laboratory of Micro & Nano Structure Optoelectronics, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

3) (*School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

( Received 30 August 2022; revised manuscript received 25 September 2022 )

## Abstract

Optical frequency combs (OFCs) each consist of a set of equally spaced discrete frequency components, and they have been widely applied to many fields such as metrology, optical arbitrary waveform generation, spectroscopy, optical communication, and THz generation. In this work, we propose a scheme for generating broadband and tunable OFCs based on a 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) under pulsed current modulation and optical injection. Firstly, a pulsed electrical signal is utilized to drive a 1550 nm-VCSEL into the gain-switching state with a broad noisy spectrum. Next, a continuous optical wave is further introduced for generating broadband and tunable OFC. Under injection light with power of 18.82  $\mu\text{W}$  and wavelength of 1551.8570 nm, and pulsed electrical signal with a frequency of 0.5 GHz and pulse width of 200 ps, an OFC with a bandwidth of 82.5 GHz and CNR of 35 dB is experimentally acquired, and the single sideband phase noise at the 0.5 GHz reaches  $-123.3$  dBc/Hz at 10 kHz. Moreover, the influences of injection light wavelength, frequency and width of pulse electrical signal on the performance of generated OFC are investigated. The experimental results show that OFCs with different comb spacings can be obtained by varying the frequency of pulsed electrical signal. For the frequency of pulsed current signal varying in a range of 0.25 GHz–3 GHz, the bandwidth of generated OFCs can exceed 60 GHz through selecting optimized injection optical wavelength and width of pulse electrical signal.

**Keywords:** optical frequency comb (OFC), vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL), current modulation, optical injection

**PACS:** 42.65.-k, 42.55.Px, 42.60.Fc

**DOI:** 10.7498/aps.72.20221709

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61775184, 61875167).

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



基于光注入下脉冲电流调制1550 nm 垂直腔面发射激光器获取宽带可调谐光学频率梳

张竣珩 樊利 吴正茂 苟宸豪 骆阳 夏光琼

**Broadband and tunable optical frequency comb based on 1550nm vertical-cavity surface-emitting laser under pulsed current modulation and optical injection**

Zhang Jun-Hui Fan Li Wu Zheng-Mao Gou Chen-Hao Luo Yang Xia Guang-Qiong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 014207 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221709

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221709>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于两正交互耦1550 nm垂直腔面发射激光器获取多路随机数

Multi-channel physical random number generation based on two orthogonally mutually coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2018, 67(2): 024204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171902>

基于单向注入垂直腔面发射激光器系统的密钥分发

Key distribution based on unidirectional injection of vertical cavity surface emitting laser system

物理学报. 2018, 67(20): 204202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181038>

高速850 nm垂直腔面发射激光器的优化设计与外延生长

Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2018, 67(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172550>

940 nm垂直腔面发射激光器的设计及制备

Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2019, 68(6): 064207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181822>

1550 nm垂直腔面发射激光器的特征参量随温度的变化

Temperature dependence of characteristic parameters of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser

物理学报. 2018, 67(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180572>

1550 nm毫瓦级单横模垂直腔面发射半导体激光器

1550-nm vertical-cavity surface-emitting laser with single-mode power of milliwatts

物理学报. 2022, 71(6): 064204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212132>