

级联光注入半导体激光器产生超宽带微波频率梳

蒋鑫**, 方捻*, 王陆唐

上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室,

上海先进通信与数据科学研究院, 上海 200444

摘要 利用光注入半导体激光器的单周期振荡与多周期振荡状态,提出了一种级联光注入半导体激光器产生超宽带微波频率梳的方案。将由连续光注入激光器产生的光频率梳注入到另一个从激光器中,再次利用激光器的光注入效应,拓宽所产生的微波频率梳带宽。光注入半导体激光器速率方程的数值研究表明,二次注入时,选取合适的注入参数,微波频率梳在幅值变化分别为 ± 2.5 dB, ± 5 dB, ± 10 dB范围内,带宽可达到52, 65, 97 GHz。因此,所提级联注入方案可以获得平坦的超宽带微波频率梳。

关键词 激光光学; 半导体激光器; 光注入; 单周期振荡; 多周期振荡; 微波频率梳

中图分类号 TN248.4; TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121403

Ultra-Broadband Microwave Frequency Comb Generated from Cascaded Optically Injected Semiconductor Lasers

Jiang Xin**, Fang Nian*, Wang Lutang

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,

Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication,

Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract Based on the single-periodic and multi-periodic oscillation states of an optically injected semiconductor laser, a scheme for the generation of an ultra-broadband microwave frequency comb through the cascaded optical injection of semiconductor lasers is proposed. In this scheme, the optical frequency comb produced from a slave laser with continuous-wave injection is injected into another one, to generate a microwave frequency comb with much wider bandwidth due to the optical injection effect of laser. The numerical investigation based on the rate equations of an optically injected semiconductor laser shows that, as for the second optical injection and the selection of appropriate parameters, the bandwidths of this microwave frequency comb reach 52, 65 and 97 GHz within amplitude fluctuations of ± 2.5 dB, ± 5 dB and ± 10 dB, respectively. Therefore, the proposed cascaded injection scheme is effective in generating ultra-broadband microwave frequency combs with more flat property.

Key words laser optics; semiconductor lasers; optical injection; single-periodic oscillation; multi-periodic oscillation; microwave frequency combs

OCIS codes 140.3570; 140.5960; 350.4010

1 引言

微波频率梳(MFC)可同时提供多个频率的微波信号,在雷达探测、宽带无线通信等领域有着广阔的应用前景。传统上,MFC基于电学方式产生,其带宽达几GHz甚至十几GHz,但其梳距不能灵活调节。而且,受电子瓶颈的限制,MFC很难向更高

频带扩展。因此,基于光学方式产生MFC的方案越来越受到关注,特别是基于半导体激光器的非线性动态特性产生MFC的方式^[1-5]。Chan等^[1]利用半导体激光器光电反馈的谐波频率锁定产生的MFC,在约25 dB幅值变化范围内,可获得2.6 GHz的带宽。Juan等^[2]研究了脉冲光注入半导体激光器中产生MFC,在 ± 5 dB幅值变化范围内,可获得

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-06-08; 录用日期: 2018-06-12

基金项目: 上海市浦江人才计划(14PJD017)

* E-mail: nfang@shu.edu.cn; ** E-mail: jiangxin0673@163.com

20 GHz 的带宽。Zhao 等^[3]研究了非相干光反馈半导体激光产生 MFC, 在 10 dB 幅值变化范围内, 产生了超过 40 GHz 的带宽。文献[4]利用双光注入半导体激光器产生 MFC, 在 ±3 dB 幅值变化范围内, 获得 30 GHz 的带宽。文献[5]研究了基于电流调制与光注入半导体激光器产生 MFC, 在 ±5 dB 幅值变化范围内, 获得 57.6 GHz 的带宽。但是这些方案产生的 MFC, 在幅值变化为 ±5 dB 时, 带宽均未超过 60 GHz, 在毫米波段占得很少, 使用范围受限。

本文提出利用光注入半导体激光器的级联方式产生超宽带 MFC 的方案。将连续光注入激光器产生的光频率梳注入到另一个从激光器中, 再次利用

半导体激光器的光注入效应, 拓宽所产生的 MFC 的带宽。

2 理论模型

光注入半导体激光器级联方式产生 MFC 的方案如图 1 所示, 主激光器 ML 输出的连续光通过可调衰减器 TA1、环形器 OC1 和偏振控制器 PC1 注入到从激光器 SL1 中。SL1 的光通过 PC1 以及 OC1 后再通过可调衰减器 TA2、环形器 OC2 和偏振控制器 PC2 注入到从激光器 SL2 中。最后 SL2 的光通过 PC2 和 OC2 输出, 经过光电探测器 PD 转变成电信号, 利用电频谱分析仪 ESA 进行观测。其中, ML 和 SL2 是波长可调谐激光器。

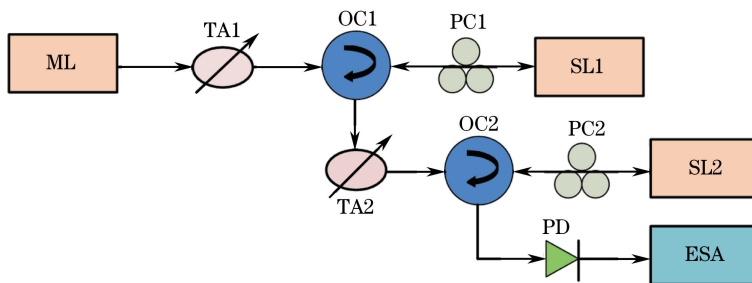


图 1 光注入半导体激光器级联方式产生 MFC 方案

Fig. 1 Scheme for MFC generation through cascaded optically injected semiconductor lasers

光注入半导体激光器的速率方程为^[6-7]

$$\frac{d(a_r + ia_i)}{dt} = \frac{1}{2} \left[\frac{\gamma_n \gamma_c \tilde{n}}{\gamma_s \tilde{J}} - \gamma_p (a_r^2 + a_i^2 - 1) \right] (a_r + ia_i) + \xi_i \gamma_c \frac{A_i}{|A_i|} [\cos(2\pi f_i t) - i \sin(2\pi f_i t)], \quad (1)$$

$$\frac{d\tilde{n}}{dt} = -[r_s + r_n (a_r^2 + a_i^2)] \tilde{n} - r_s \tilde{J} (a_r^2 + a_i^2 - 1) + \frac{r_s r_p \tilde{J}}{r_c} (a_r^2 + a_i^2) (a_r^2 + a_i^2 - 1), \quad (2)$$

式中: a_r, a_i 为从激光器输出光场复振幅的实部与虚部; \tilde{n} 为归一化载流子密度; \tilde{J} 为归一化偏置电流密度; $b, \gamma_c, \gamma_s, \gamma_n, \gamma_p$ 分别为线宽增强因子, 腔衰减率, 载流子自发弛豫速率, 载流子差分弛豫速率和载流子非线性弛豫速率; ξ_i 为归一化注入强度; f_i 为主、从激光器间的频率失谐; A_i 为第二次注入时注入光场的复振幅, 也是第一个从激光器输出光场的复振幅, 第一次注入时, 令 $A_i / |A_i| = 1$ ^[7]。

采用四阶龙格库塔算法对上述速率方程进行仿真, 步长为 1 ps, 计算时间是 0.1 μs。两个从激光器的参数分别为 $b = 3.2, \gamma_c = 5.36 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}, \gamma_s = 5.96 \times 10^9 \text{ s}^{-1}, \gamma_n = 7.53 \times 10^9 \text{ s}^{-1}, \gamma_p = 1.91 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}, \tilde{J} = 1.222$ ^[6]。

光注入半导体激光器产生 MFC 主要是利用其单周期振荡与多周期振荡特性, 它们对注入强度与频率失谐的变化比较敏感^[6-11], 所以仿真时主要改变注入强度和频率失谐这两个参数。频率失谐一般不超过 100 GHz, 注入强度的取值范围一般为 0~0.4^[6,8,10-11]。

3 仿真结果

3.1 注入强度和频率失谐对一次光注入产生 MFC 的影响

首先考虑注入强度对一次光注入激光器产生 MFC 的影响。根据文献[9], 频率失谐在 10 GHz 附近时, 在较弱的范围内改变注入强度, 从激光器产生的具有单边带效应的光谱的谱线功率差较小, 即易

于产生较为平坦的光频率梳,方便二次注入后产生平坦的 MFC。所以固定频率失谐在 10 GHz,从 0.01 到 0.26,每隔 0.01 选取一个注入强度值(个别状态变化剧烈的地方,选取间隔更小),依次观察从激光器 SL1 的输出功率谱,寻找一次光注入激光器产生的 MFC 性能与注入强度间的关系。

图 2 是注入强度分别为 0.03、0.047 和 0.1 时 SL1 的输出功率谱。可以看出,不同的注入强度下,生成的 MFCs 的幅值和带宽也相应地改变。图 3 给出了频率失谐为 10 GHz,SL1 产生的 MFCs 的幅值变化范围为 ± 10 dB 时,其谱线根数与带宽随注入

强度的变化关系。注入强度从 0.01 增加到 0.047 时,SL1 的工作状态从单周期振荡改变为多周期振荡,谱线根数从 3 根不断增加,在注入强度为 0.047 时达到了 23 根,如图 2(b)所示,带宽从 19 GHz 扩展到 52 GHz,但带宽不是一直增加,起伏较大。注入强度在 0.048~0.059 时,SL1 工作在混沌状态,不能产生 MFC,谱线根数和带宽均记作零。注入强度为 0.06~0.23 时,带宽逐渐增加,但谱线维持在 3 根左右,效果不理想。注入强度为 0.24 以上时,SL1 进入到注入锁定状态,得不到 MFC,此时的谱线根数也记作零。

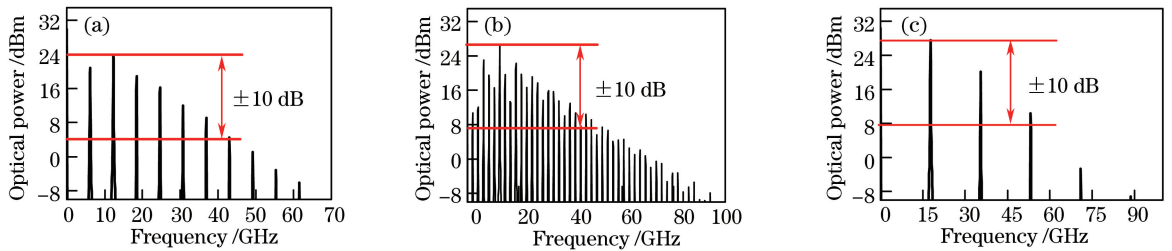


图 2 频率失谐为 10 GHz,不同注入强度时 SL1 的输出功率谱。(a) $\xi_1=0.03$;(b) $\xi_1=0.047$;(c) $\xi_1=0.1$

Fig. 2 Output power spectra of SL1 under different injection strengths at frequency detuning of 10 GHz.

(a) $\xi_1=0.03$; (b) $\xi_1=0.047$; (c) $\xi_1=0.1$

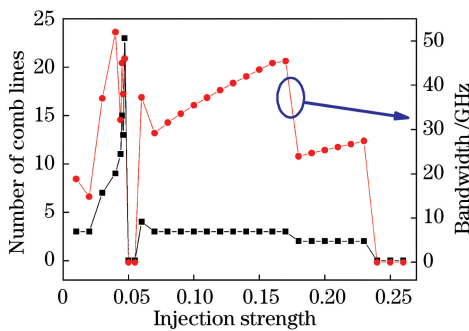


图 3 频率失谐为 10 GHz,SL1 产生的 MFCs 的幅值变化为 ± 10 dB 时谱线根数和带宽随注入强度的变化

Fig. 3 Number of comb lines and bandwidth versus injection strength at frequency detuning of 10 GHz and amplitude variation of ± 10 dB for MFCs generated by SL1

根据前述的注入强度对 MFC 的影响,兼顾带宽、谱线根数与平坦度等各项性能指标,固定注入强度为 0.04,研究频率失谐对一次光注入半导体激光器产生的 MFC 性能的影响。此时,从激光器产生的光频率梳的谱线功率差随频率失谐的减小而减小^[9]。所以,频率失谐的取值范围为 5~20 GHz,每隔 1 GHz 选取一个(个别状态变化剧烈的地方,间隔小于 1 GHz)。

图 4 分别给出了频率失谐在 7,10,12 GHz 时

SL1 的输出功率谱。可以看出,不同频率失谐下获得 MFCs 的 ± 10 dB 幅值变化范围内的带宽和谱线根数明显不同。图 5 展示了在注入强度为 0.04,SL1 产生的 MFC 幅值变化范围为 ± 10 dB 时,其谱线根数与带宽随频率失谐的变化。在频率失谐为 5~8.1 GHz 时,SL1 的工作状态在单周期振荡和混沌态间跳变,对频率失谐的变化很敏感,可获得的谱线根数只有 4 根;当频率失谐为 8.2~11 GHz 时,谱线根数为 9 根左右,其中频率失谐为 10 GHz 时,带宽达到了 52 GHz 左右;频率失谐为 11.1 GHz 时,SL1 再次进入混沌状态;频率失谐为 11.2 GHz 时,谱线根数多达 38 根,但带宽只有 42 GHz;频率失谐为 11.4~11.5 GHz 时,SL1 再次进入混沌状态;频率失谐为 11.6 GHz 以上时,SL1 保持单周期振荡状态,谱线根数只有 2~3 根。

由以上仿真结果可以看出,通过一次光注入半导体激光器产生 MFC,要想获得较多的谱线根数和大的带宽,需要选取比较弱的注入强度,如 0.04,频率失谐在 8.2~11 GHz 范围内。此时,从激光器工作在多周期振荡状态。但其最大带宽依然未能达到预期效果。为了得到性能更佳的 MFC,把一次注入得到的光频率梳注入从激光器 SL2,再次利用光注入半导体激光器的非线性效应,拓宽所产生的 MFC 的带宽。

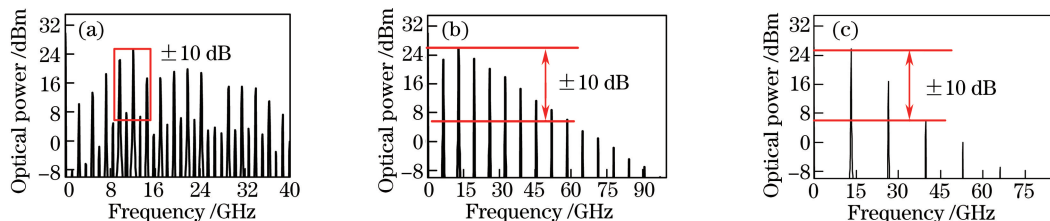


图4 注入强度为0.04,不同频率失谐时SL1的输出功率谱。(a) $f_i=7$ GHz;(b) $f_i=10$ GHz;(c) $f_i=12$ GHz

Fig. 4 Output power spectra of SL1 under different frequency detunings at injection strength of 0.04.

(a) $f_i=7$ GHz; (b) $f_i=10$ GHz; (c) $f_i=12$ GHz

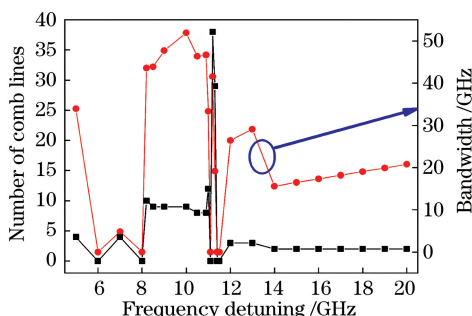


图5 注入强度为0.04,SL1产生的MFCs幅值变化 ± 10 dB时谱线根数和带宽随频率失谐的变化

Fig. 5 Number of comb lines and bandwidth versus frequency detuning at injection strength of 0.04 and amplitude variation of ± 10 dB for MFCs generated by SL1

3.2 注入强度和频率失谐对第二次光注入产生MFC的影响

将注入强度为0.04,频率失谐为10 GHz时一次注入得到的光频率梳注入到从激光器SL2中。仿照一次光注入的情况,先固定两个从激光器之间的频率失谐为10GHz,改变注入强度,寻找二次注

入激光器产生的MFC性能与注入强度间的关系。设置注入强度在0.01~0.3之间变化,观察从激光器SL2的输出功率谱。

图6为注入强度分别为0.03,0.1和0.2时SL2的输出功率谱。可以看出,不同注入强度下获得的MFC在 ± 10 dB幅值变化范围内的带宽和谱线根数也不同。图7展示了在频率失谐为10 GHz,SL2产生的MFC幅值变化范围为 ± 10 dB时,其谱线根数与带宽随注入强度的变化。注入强度从0.01增加到0.032,SL2在不同的多周期振荡状态之间变化,谱线根数维持在6根左右,带宽也稳定在32 GHz附近。当注入强度为0.035时,谱线根数达到了18根,但是带宽只有36.8 GHz。注入强度为0.04~0.05时,SL2工作在混沌状态,不能产生MFC。注入强度为0.053~0.3时,SL2又在不同周期振荡状态之间变化,谱线根数在7~14之间变化,带宽在32.5~58.4 GHz之间变化。其中,注入强度为0.19~0.25时,产生的MFC带宽和谱线根数基本不变,这无疑降低了系统对器件稳定性的要求。因此,二次注入时,注入强度选在这个范围比较好。

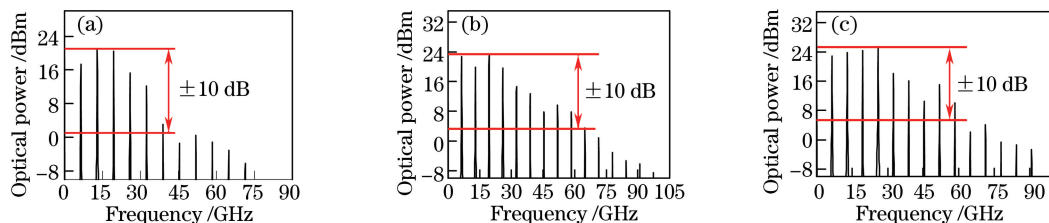


图6 频率失谐为10 GHz,不同注入强度时SL2的输出功率谱。(a) $\xi_i=0.03$;(b) $\xi_i=0.1$;(c) $\xi_i=0.2$

Fig. 6 Output power spectra of SL2 under different injection strengths at frequency detuning of 10 GHz.

(a) $\xi_i=0.03$; (b) $\xi_i=0.1$; (c) $\xi_i=0.2$

根据图7的仿真结果,固定注入强度为0.2,频率失谐在5~60 GHz之间变化,研究频率失谐对二次光注入半导体激光器产生的MFC性能的影响。图8分别给出了频率失谐在6,31,55 GHz时SL2的输出功率谱。可以看出,不同频率失谐下,SL2工

作状态不同,获得的MFC在 ± 10 dB幅值变化范围内的带宽和谱线根数明显不同。图9展示了在注入强度为0.2,SL2产生的MFC幅值变化范围为 ± 10 dB时,其谱线根数与带宽随频率失谐的变化。频率失谐为5~32GHz时,随着频率失谐的增加,

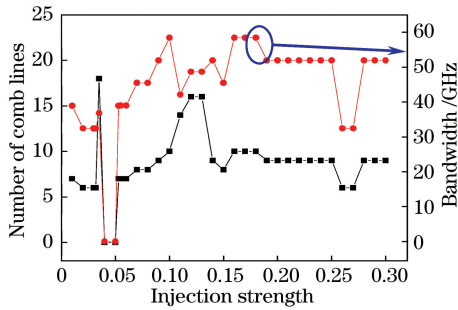


图7 频率失谐为10 GHz,SL2产生的MFCs的幅值变化为 ± 10 dB时谱线根数和带宽随注入强度的变化
Fig. 7 Number of comb lines and bandwidth versus injection strength at frequency detuning of 10 GHz and amplitude variation of ± 10 dB for MFCs generated by SL2

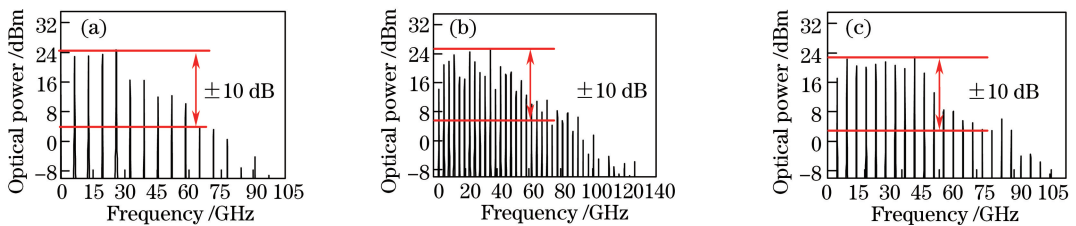


图8 注入强度为0.2,不同频率失谐时SL2的输出功率谱。(a) $f_i=6$ GHz;(b) $f_i=31$ GHz;(c) $f_i=55$ GHz
Fig. 8 Output power spectra of SL2 under different frequency detunings at injection strength of 0.2.
(a) $f_i=6$ GHz;(b) $f_i=31$ GHz;(c) $f_i=55$ GHz

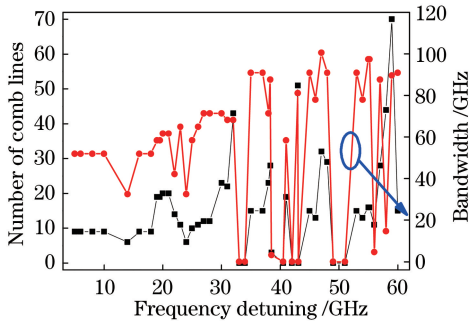


图9 注入强度为0.2,SL2产生的MFCs幅值变化为 ± 10 dB时谱线根数和带宽随频率失谐的变化
Fig. 9 Number of comb lines and bandwidth versus frequency detuning at injection strength of 0.2 and amplitude variation of ± 10 dB for MFCs generated by SL2

图10对比了一次注入和二次注入的效果。图10(a)是一次注入,注入强度为0.04,频率失谐为10 GHz,SL1工作在倍周期振荡状态时产生的MFC,幅值变化为 ± 10 dB,带宽只有52 GHz。图10(b)是二次注入,注入强度为0.2,频率失谐为55 GHz,SL2工作在多周期振荡状态时产生的MFC,幅值变化为 ± 10 dB,带宽达到97 GHz;幅值变化为 ± 5 dB,带宽达到65 GHz;幅值变化为

SL2在不同的多周期振荡状态之间变化,谱线根数在6~43之间波动,带宽在32.5~71.4 GHz之间波动。频率失谐为33~51 GHz时,SL2的工作状态对频率失谐的变化比较敏感,在多周期振荡和混沌态之间跳变。谱线根数和带宽变化比较剧烈,其中,频率失谐为47 GHz时,带宽达到了100.6 GHz,谱线根数为32根。频率失谐为53~60 GHz时,SL2的工作状态再次在不同的多周期振荡状态间变化,谱线根数在11~70之间变化,带宽在4.63~97.4 GHz之间变化,但两者的变化幅度明显大于频率失谐较小时的变化幅度。其中,频率失谐为59 GHz时,谱线根数达到70根,此时带宽为89.6 GHz。

± 2.5 dB,带宽达到52 GHz。图10(c)是二次注入,注入强度为0.2,频率失谐为47 GHz,SL2工作在更多周期振荡状态时产生的MFC,幅值变化为 ± 10 dB,带宽达到100.6 GHz,但其平坦度不如频率失谐为55 GHz时产生的频率梳,幅值变化为 ± 5 dB,带宽下降到52 GHz。由对比可以看出,通过二次注入,产生的MFC的带宽明显扩宽。

根据文献[12],光注入半导体激光器具有不稳定性,在线宽增强因子 b 较小时,注入强度 ξ_i 的增大对系统的稳定性几乎没有影响,同样,在 ξ_i 较小时, b 的变化也几乎不改变系统的稳定性;只有在 b 和 ξ_i 都较大的情况下系统才表现出不稳定性。因此,在利用本方法产生超宽带MFC时,应尽量选用线宽增强因子 b 较小的半导体激光器,同时选择相对较弱的注入强度。图10(b)、(c)的超宽带MFC都是在 $b=3.2$ 、一次注入强度为0.04、二次注入强度为0.2情况下得到的。 b 值在1~10之间^[12],3.2属于相对较小的值,0.04和0.2在0~0.4的注入强度取值范围内也属于弱和中等水平。因此,从理论上讲,利用本文方法可以产生稳定的MFC。实际使用时,还需要考虑各个半导体激光器自身的工作稳定问题,如温度的变化和偏置电流的漂移等,需要采

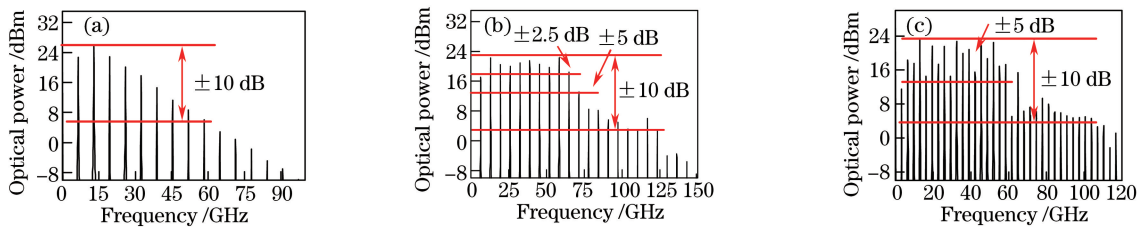


图 10 一次注入与二次注入产生 MFC 效果对比。(a)一次注入(0.04, 10 GHz);
(b)二次注入(0.2, 55 GHz);(c)二次注入(0.2, 47 GHz)

Fig. 10 MFC effect comparison for single and cascaded injections. (a) Single injection (0.04, 10 GHz);
(b) cascaded injection (0.2, 55 GHz); (c) cascaded injection (0.2, 47 GHz)

取温控设施和稳定驱动电流的措施^[13-14],才能产生可以实用的稳定的超宽带 MFC。

4 结 论

通过数值研究光注入半导体激光器的速率方程,比较一次注入以及光注入级联方式产生 MFC 性能的优劣,证实在合适的注入参数下,当一次注入的从激光器工作在倍周期振荡状态,且二次注入的从激光器工作在多周期振荡状态时,光注入级联方式可以获得平坦的超宽带 MFC,如振幅变化为 ± 2.5 dB 时,带宽达 52 GHz,谱线根数为 9 根;振幅变化为 ± 5 dB 时,带宽达 65 GHz,谱线根数为 11 根;振幅变化为 ± 10 dB 时,带宽高达 97 GHz,谱线根数为 16 根。在兼顾平坦度的条件下,二次注入有效地增加了 MFC 的带宽,提升了 MFC 的性能。研究结果为利用光注入半导体激光器产生 MFC 的应用提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] Chan S C, Xia G Q, Liu J M. Optical generation of a precise microwave frequency comb by harmonic frequency locking[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(13): 1917-1919.
- [2] Juan Y S, Lin F Y. Microwave-frequency-comb generation utilizing a semiconductor laser subject to optical pulse injection from an optoelectronic feedback laser[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(11): 1636-1638.
- [3] Zhao M R, Wu Z M, Deng T, *et al.* Tunable and broadband microwave frequency combs based on a semiconductor laser with incoherent optical feedback[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(5): 054207.
- [4] Lin C T, Juan Y S. Characteristics of microwave frequency combs generated by a semiconductor laser under dynamical dual-beam injection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8980: 898021.
- [5] Fan L, Xia G Q, Tang X, *et al.* Tunable ultra-broadband microwave frequency combs generation based on a current modulated semiconductor laser under optical injection[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 17764-17771.
- [6] Chan S C, Hwang S K, Liu J M. Period-one oscillation for photonic microwave transmission using an optically injected semiconductor laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14921-14935.
- [7] Miao W Y. Wavelength/frequency conversion of single sideband modulation light based on optically injected semiconductor laser[D]. Shanghai: Shanghai University, 2016.
缪婉仪. 单边带调制光注入半导体激光器实现波长/频率变换[D]. 上海: 上海大学, 2016.
- [8] Hwang S K, Liu J M. Dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser[J]. *Optics Communications*, 2000, 183: 195-205.
- [9] Miao W Y, Fang N, Wang L T. Single-side band effect based on optically injected semiconductor laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0214001.
缪婉仪, 方捻, 王陆唐. 光注入半导体激光器产生单边带效应的研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0214001.
- [10] Yan S L. Studies on bifurcation and period in semiconductor laser due to optical injection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 996-1001.
颜森林. 光注入半导体激光器分岔与周期研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 996-1001.
- [11] Sun W Y, Zhang S H, Wu T A, *et al.* Broadening the bandwidth of chaotic carrier transmitter in semiconductor lasers with chaotic optical injection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 061410.
孙巍阳, 张胜海, 吴天安, 等. 混沌光注入展宽半导体激光器混沌载波发射机带宽[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 061410.

- [12] Lei L L, Guo Q Z. Instability of semiconductor laser with external light injection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 041901.
雷璐璐, 郭奇志. 具有外部注入光场的半导体激光器的不稳定性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 041901.
- [13] Wang Q, Guo J J, Chen W, *et al.* Widely tunable distributed feedback semiconductor lasers with constant power and narrow linewidth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0101004.
王琪, 郭锦锦, 陈伟, 等. 功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0101004.
- [14] Li C G, Wang Y D, Gao Z L, *et al.* Power supply of quantum cascade laser with low temperature drift and high stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s214008.
李春光, 王一丁, 高宗丽, 等. 低温漂高稳定性量子级联激光器驱动电源[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s214008.