

光注入半导体激光器产生可调谐高频微波^{*}

牛生晓 王云才[†] 贺虎成 张明江

(太原理工大学理学院物理系,太原 030024)

(2009 年 1 月 13 日收到,2009 年 2 月 24 日收到修改稿)

利用光注入半导体激光器产生的单周期振荡,实验获得了 6.1—12.9 GHz 范围内频率连续可调的微波光信号.同时利用半导体激光器速率方程,对光注入半导体激光器产生高频微波进行了数值模拟.模拟和实验结果均表明微波信号产生于注入光和激光器腔模之间的拍频现象,其频率随着注入光强度和波长失谐的增大而增大.模拟结果预测该方法可以产生频率大于 40 GHz 的高频微波.

关键词:光通信,光生微波,拍频,半导体激光器

PACC:7820,4260H,4265K,4280S

1. 引言

高频微波特别是毫米波在通信、军事、医疗、信息等领域具有广泛的应用.产生微波的方法有很多种,利用电流调制产生微波信号的方法已经被广泛应用,但是该方法受到电学器件寄生参数的影响而严重限制了信号的频率.光学微波信号的产生可以避开电子器件带宽瓶颈的制约,容易产生高频微波,因而引起人们的广泛关注.同时光生毫米波技术的发展可推动 radio-over-fiber 系统的迅速完善,而超宽带无线通信有可能成为解决光纤通信系统中“最后一公里”难题的终结者.

光生毫米波的产生方案有许多种,其中利用两个光波之间相互作用产生微波信号是最具应用前景的技术之一.1995 年 Novak 等^[1]利用对脉冲激光器进行滤波从而得到了两个波长之间拍频产生微波信号.1997 年 Yao 等^[2,3]报道了利用耦合光电反馈环产生微波信号.1998 年 Pham 等^[4]利用两端级联双波长分布反馈(DFB)半导体激光器之间的拍频产生微波信号.1999 年 Wang 等^[5]报道了利用级联增益耦合的 DFB 半导体激光器和级联折射率耦合 DFB 半导体激光器的拍频现象分别产生了微波信号.1999 年 Hui 等^[6]报道利用 DFB 半导体激光器的两个波长之间的拍频产生微波信号.Simpson 等^[7]和 Liu 等^[8,9]

分别报道了利用光注入半导体激光器产生的单周期振荡现象产生微波信号.2004 年 Liu 等^[8]用外调制技术和光反馈技术分别实现了对光生微波信号的线宽压缩.2008 年谢红云等^[10]利用两个并联的 DFB 激光器在 Y 形波导耦合器中通过拍频产生微波信号.光生微波的技术和理论仍在不断被提出和完善.

本文利用光注入半导体激光器的单周期振荡现象产生了频率可调的微波信号,微波信号的频率可由注入光功率和波长失谐量来调节,并且利用主、从激光器之间的拍频现象对该微波信号的产生进行了解释.同时利用半导体激光器的速率方程对该结果进行了理论分析.模拟结果和实验结果完全相符.

2. 实验装置和结果

产生微波的实验装置示意图如图 1 所示.主、从激光器均为分布反馈半导体激光器,主激光器输出的光经掺铒光纤放大器(EDFA)和可调衰减器后,通过环形器注入从激光器.偏振控制器(PC)用来控制注入光的耦合效率.利用光电探测器和信号分析仪(Agilent E4407B)对输出光进行测量.用光谱分析仪(Agilent 86140B)来观察输出光谱.

主激光器的偏置电流为 30.0 mA($1.5I_{th}$),通过温度控制器将主激光器的工作波长稳定在 1553.950 nm.从激光器的偏置电流为 30.0 mA($1.5I_{th}$),输出

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60577019,60777041)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

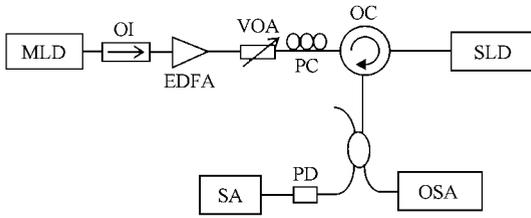


图1 实验装置示意图 MLD为主激光器,SLD为从激光器,OI为光隔离器,EDFA为掺铒光纤放大器,VOA为可调光衰减器,OC为光环形器,PD为光电探测器,SA为信号分析仪,OSA为光谱分析仪

光的波长稳定在 1554.000 nm,输出光功率为 -0.96 dBm.主、从激光器之间的波长失谐量为 0.05 nm,对应的频率失谐量为 6.1 GHz.

当主激光器输出的光注入从激光器后,随着注入光功率和波长失谐量的改变,从激光器内会产生一系列的非线性动力学特性:单周期振荡、二倍周期振荡、四倍周期振荡、混沌、四波混频等^[11,12].通过调节 EDFA 和可调衰减器改变主激光器注入从激光器的光功率,当注入光功率为 -5.5 dBm 时,从激光器输出为单周期振荡.在频谱图上出现了频率为

8.1 GHz 的一个微波信号,且微波的 3 dB 线宽约为 20 MHz,如图 2(a)所示.图 2(d)为注入前主、从激光器及光注入后从激光器输出的光谱图,从图中可以看出光注入后从激光器的波长产生一个微小的红移量约 0.015 nm,使得主、从激光器之间的波长失谐量变为 0.065 nm,即此时主、从激光器之间的频率失谐量约为 8.1 GHz,正好等于产生的微波信号的中心频率.加大注入光的光功率,从激光器输出光的红移量加大,输出的微波频率也增大,并且微波的频率均与这两个光波之间的拍频相同.可推得该微波的产生是由于注入和被注入光之间的拍频产生.图 2(b)和(e)为注入光功率为 1.8 dBm 时输出 12.1 GHz 微波信号的光谱图和频谱图.注入光功率 1.8 dBm 不变的情况下,通过温度控制将主激光器的波长调节到 1553.887 nm,即自由运行时主、从激光器频率失谐量为 14.81 GHz,可得到频率为 16.2 GHz 的微波信号.图 2(c)和(f)为该情况下的光谱图和频谱图.在自由运行时主、从激光器频率失谐量为 6.1 GHz 不变的情况下,通过调节注入光功率可以得到 6.1 — 12.9 GHz 频率范围内连续可调的微波信号,如图 3 所示.同时改变波长失谐量还可以得到不同频率范围内的微波信号.

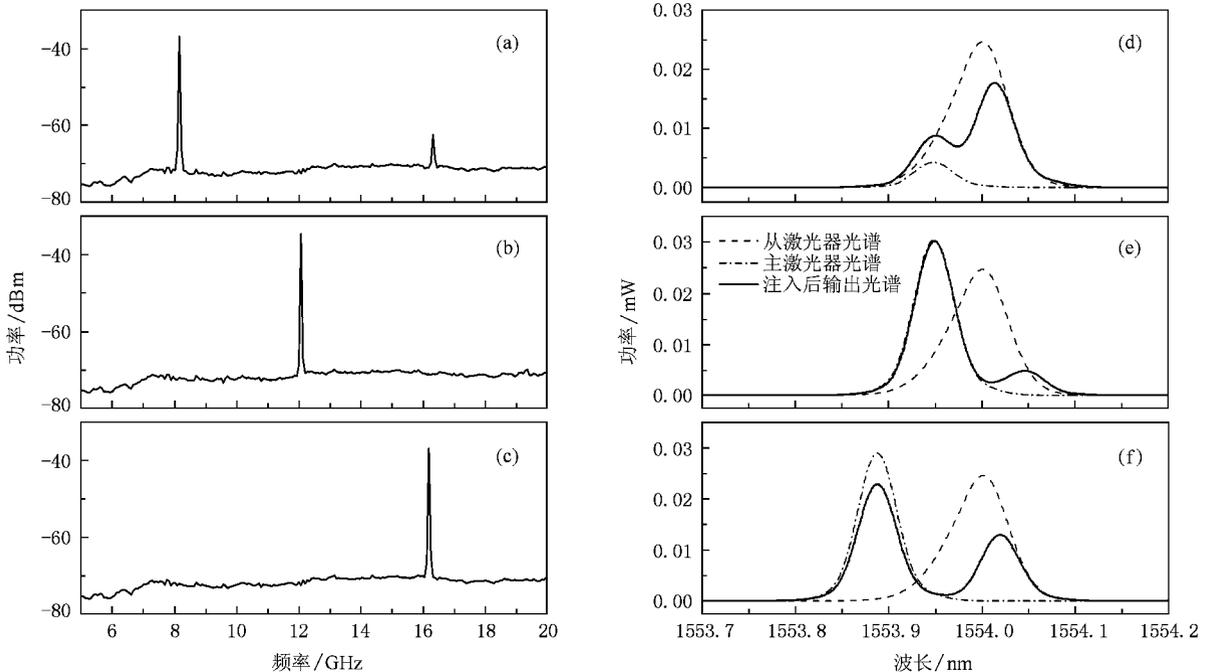


图2 光子微波的频谱图和光谱图 (a)–(c)分别为产生的 8.1 、 12.1 和 16.2 GHz 光子微波的频谱 (d)–(f)分别为对应的主、从激光器的光谱

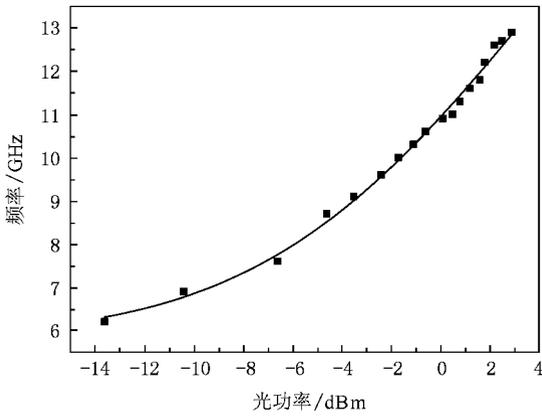


图3 波长失谐量为 0.05 nm 的情况下微波信号频率随注入光功率的变化

3. 数值模拟和模拟结果

对于光注入半导体激光器产生微波的现象利用半导体激光器的速率方程进行了理论分析,从激光器速率方程如下:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{eV} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g(N(t) - N_0) \frac{S(t)}{1 + \epsilon S(t)}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} = & \frac{\beta \Gamma N(t)}{\tau_n} + \Gamma g(N(t) - N_0) \frac{S(t)}{1 + \epsilon S(t)} - \frac{S(t)}{\tau_p} \\ & + 2 \frac{k_{inj}}{\tau_{in}} \sqrt{S(t - \tau_c) S_m(t)} \cos(\xi(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\phi(t)}{dt} = & \frac{1}{2} \alpha \left[\frac{\Gamma g(N(t) - N_0)}{1 + \epsilon S(t)} - \frac{1}{\tau_p} \right] \\ & - \frac{k_{inj}}{\tau_{in}} \sqrt{\frac{S_m(t)}{S(t - \tau_c)}} \sin(\xi(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\xi(t) = \phi(t) - \phi(t - \tau_c) + (\omega_2 - \omega_1)t, \quad (4)$$

式中 N 、 S 和 ϕ 分别为从激光器的载流子密度、光子密度和电场的相位; S_m 为主激光器的光子密度; τ_c

为外部注入光的传输时间; $k_{inj} = (1 - R) \sqrt{\frac{r_p}{R}}$ 是衡量注入光强弱的一个参量,其中 R 为从激光器输出端面的光强反射率, r_p 为注入从激光器与主激光器输出的光功率之比; ω_1 和 ω_2 分别为主、从激光器中心模式的角频率. 各个符号的物理意义和参量见表 1.

表 1 各个符号的物理意义和参量

符号/单位	物理量	参量
e/C	电子电量	1.6×10^{-19}
V/m^3	有源区体积	1.5×10^{-16}
τ_n/s	载流子寿命	2.8×10^{-9}
τ_p/s	光子寿命	1.21×10^{-12}
Γ	限制因子	0.24
N_{th}/m^{-3}	阈值载流子密度	1.146×10^{23}
N_0/m^{-3}	透明载流子密度	0.5816×10^{23}
ϵ/m^3	增益饱和系数	3×10^{-23}
α	线宽增强因子	5.8
$g/m^3 \cdot s^{-1}$	微分增益系数	2×10^{-12}
β	自发辐射因子	1×10^{-5}
R	端面强度反射率	0.5
λ/nm	波长	1550

将主、从激光器之间的频率失谐设置为 20.00 GHz,当注入光强系数为 0.2 时,可得到频率为 20.96 GHz 的微波信号,如图 4(a)所示.其对应的光谱图如图 4(e)所示,从激光器产生了约 0.96 GHz 的红移量,主、从激光器光频率之间的失谐量等于产生微波的频率.增大注入系数从激光器输出光的红移量增大,当注入光强系数增大为 0.6 和 0.9 时,红移量分别增大为 4.51 和 7.86 GHz,如图 4(f)和(g)所示.相应地产生微波信号的频率也增大,分别为 24.51 和 27.86 GHz,如图 4(b)和(c)所示.注入强度系数为 0.8 的情况下,主、从激光器频率失谐量增大为 40 GHz 时,产生微波信号的频率增大为 42.27 GHz.图 4(d)和(h)分别为该情况下的频谱和光谱.主、从激光器之间的频率失谐量均与微波信号的频率相一致,可推断微波信号是主、从激光器拍频的结果.模拟结果与实验结果完全符合.并且在注入光强比较小的时候,产生的微波信号为双边带微波信号,即光谱图的左右边带光功率相差不是太大,如图 4(e).当注入光强度比较大的时候,产生的微波信号变为单边带微波信号,右边带比左边带的功率要高很多,如图 4(g)所示.通过改变注入光功率可以得到频率连续可调的微波信号,如图 5 所示.在光波频率失谐量为 40.00 GHz 的情况下,通过改变注入光强系数可以得到 40.00—44.00 GHz 频率范围内连续可调的微波信号.改变主、从激光器之间的频率失谐量可以得到不同频率范围内的微波信号.

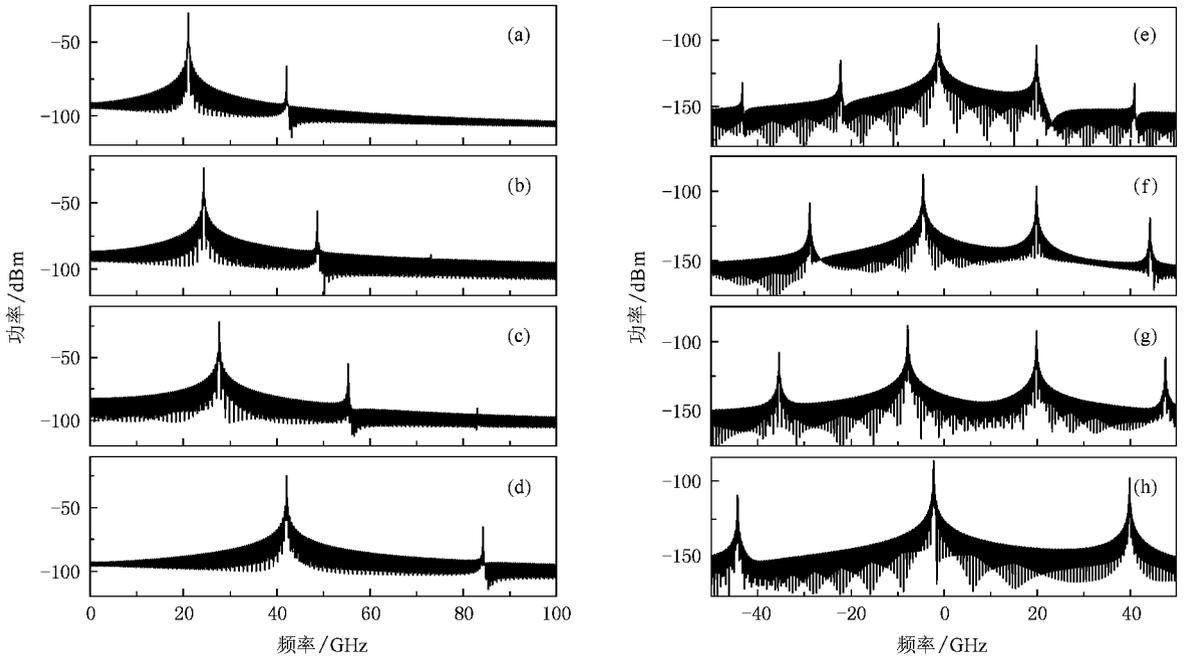


图4 频谱图和光谱图 (a)–(d)分别为产生频率为 20.96、24.51、27.86 和 42.27 GHz 光生微波信号的频谱 (e)–(h)分别为产生频率对应情况下从激光器的光谱

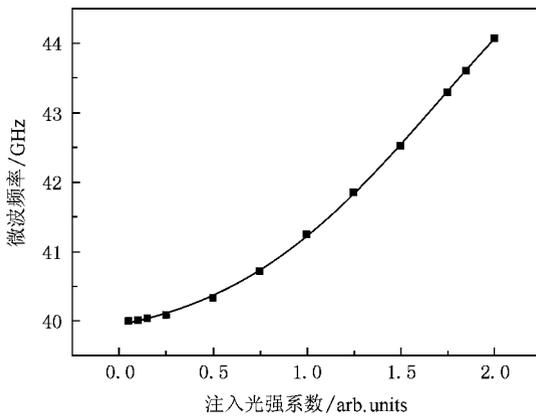


图5 主、从激光器频率失谐量为 40 GHz 情况下微波频率随注入强度系数的变化

4. 结 论

实验利用光注入半导体激光器产生的单周期振荡实现了频率为 8.1、12.1 和 16.2 GHz 线宽约为 20 MHz 的微波信号. 光谱分析表明该微波信号是由于主、从激光器之间的拍频产生的, 信号频率受注入光强度和波长失谐量的影响. 增大注入光强, 从激光器的波长红移量增大, 相应的微波信号频率也增大. 在波长失谐量 0.05 nm 的情况下, 通过改变注入光强度实现了 6.1—12.9 GHz 频率范围内连续可调的微波信号. 改变波长失谐量可获得不同频率范围连续可调的微波信号. 同时利用半导体激光器的速率方程对实验结果进行了数值模拟, 模拟结果与实验结果完全相符.

[1] Novak D, Ahmed Z B, Waterhouse R 1995 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **43** 2257
 [2] Yao X S, Maleki L 1997 *Opt. Commun.* **22** 1867
 [3] Yao X S, Davis L, Maleki L 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 73
 [4] Pham G, Duan G H 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1000
 [5] Wang X H, Mao W M, Mohammed A, Pappert S, Hong J, Li G F 1999 *Photon. Technol. Lett.* **11** 1292

[6] Hui R, Zhu B, Demarest K, Allen C, Hong J 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 518
 [7] Simpson T B, Doff F 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 1999
 [8] Chan S C, Liu J M 2004 *J. Sel. Topics Quantum Electron.* **10** 1025
 [9] Chan S C, Liu J M 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 699
 [10] Xie H Y, Jin D M, He L J, Zhang W, Wang L, Zhang W R,

Wang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4558 (in Chinese) [谢红云、金冬月、何莉剑、张蔚、王路、张万荣、王圩 2008 物理学报 **57** 4558]

Semiclass. Opt. **9** 765

[12] Hwang S K, Liu J M, White J K 2004 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **10** 974

[11] Simpson T B, Liu J M, Huang K F, Tai K 1997 *Quantum*

Tunable photonic microwave generation using optically injected semiconductor laser^{*}

Niu Sheng-Xiao Wang Yun-Cai[†] He Hu-Cheng Zhang Ming-Jiang

(*Department of Physics, College of Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

(Received 13 January 2009 ; revised manuscript received 24 February 2009)

Abstract

Optically injected semiconductor laser is applied to photonic microwave generation. The microwave is generated by the beat between the oscillation frequency of the slave laser and that of the external injection light. We find that the microwave frequency can be tuned from 6.1 GHz to 12.9 GHz by varying the injection optical power in experiment. The tunable ability in our scheme can also be achieved through adjustment of the frequency detuning. Numerical simulations indicate that the frequency of the optically generated microwave can be higher than 40 GHz by using the optical injection semiconductor laser technique.

Keywords : optical communications , photonic microwave , beating frequency , semiconductor laser

PACC : 7820 , 4260H , 4265K , 4280S

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60577019 , 60777041).

[†] Corresponding author. E-mail : wangyc@tyut.edu.cn