

半导体激光器型全光波长转换器的啁啾分析*

张 菟 马军山 陈家璧

(上海理工大学光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

摘 要 利用速率方程分析了转换信号光的频率啁啾, 考虑到了外界注入信号光的放大. 转换过程中, 信号光的注入将会导致了光腔内载流子数发生变化, 进而引起激光器输出频率的改变, 产生啁啾. 研究发现, 较大的激光器注入电流可以有效地抑制频率啁啾, 较高的注入信号光功率则可以在保证高转换信号消光比的同时抑制频率啁啾.

关键词 全光波长转换; 半导体激光器; 频率啁啾; 增益调制效应

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

作为全光网络(AON)的关键技术之一, 全光波长转换技术可以将一个信号波长转换到其它波长, 将固定波长交叉连接发展为波长可变交叉连接(WIXC), 从而避免 OXC 中的波长阻塞^[1~4]. 利用全光波长转换技术还可以把不同波长系列产品统一到同一波长标准上, 实现不同光网络间的波长匹配. 此外, 通过波长转换, 可以增强网络重构、网络管理的灵活性、可靠性^[5,6].

在光纤传输线路中, 需要使用线性光放大器来补偿系统损耗, 光放大器所产生的随机噪声积累, 将降低光信号的消光比. 针对上述问题, 提出了基于激光器的全光波长转换器, 它的突出优点是转换信号的消光比非常高, 这样在实现波长转换的同时, 还可改善信号的消光比. 迄今为止, 国内外已有关于激光器型全光波长转换器的理论及实验研究报告^[7~12].

基于半导体激光器的全光波长转换是利用外部注入信号光对激光器的增益调制效应实现的. 在外部信号光进入到激光器内部以后, 信号光光子将会消耗激光器谐振腔内的载流子, 载流子数的变化又将导致模折射率和传播常数的变化, 因此产生了相位调制, 最终会导致激光器输出转换信号光的频率啁啾. 本文利用激光器速率方程建立起理论模型, 对可能影响转换信号光频率啁啾的几个重要参数进行了分析与讨论.

1 理论模型

外部注入信号光对激光器的增益调制效应属于一种大信号调制, 当外部信号光注入到激光器谐振

腔内时, 激光器本身发出的连续光功率下降, 当取消外部信号光时, 激光器输出功率又恢复原先的值. 这样, 激光器的输出功率被注入信号光所调制, 实现波长转换功能.

在建立速率方程的时候, 考虑到激光器一般都是多个模式并存, 即使是单纵模的激光器严格来讲也不止一个模式. 由此可以认为外界注入信号光波长可以和某一边模的输出波长相等, 对于二者不相等的情况, 由于每个模式都有一定的线宽, 信号光将会有一部分光子进入到该边模参与消耗载流子并得以放大. 在本模型中, 激光器主模输出波长等于转换后的信号光波长, 为了简化, 令边模输出波长与注入信号光波长相等. 同时考虑到注入光的放大, 激光器的速率方程可以建立为

$$\dot{N} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_c} - \nu_g G_1 [1 - \epsilon_{11} P_1 - \epsilon_{12} (P_2 + P_{in})] P_1 - \nu_g G_2 [1 - \epsilon_{21} P_1 - \epsilon_{22} (P_2 + P_{in})] (P_2 + P_{in}) \quad (1)$$

$$\dot{P}_1 = \Gamma \nu_g G_1 [1 - \epsilon_{11} P_1 - \epsilon_{12} (P_2 + P_{in})] P_1 - \frac{P_1}{\tau_{p1}} + R_{sp} \quad (2)$$

$$\dot{P}_2 = \Gamma \nu_g G_2 [1 - \epsilon_{21} P_1 - \epsilon_{22} (P_2 + P_{in})] \cdot (P_2 + P_{in}) - \frac{P_2}{\tau_{p2}} + R_{sp} \quad (3)$$

$$G_1 = a_1 (N - N_t) \quad (4)$$

$$G_2 = a_2 (N - N_t) \quad (5)$$

$$R_{sp} = \Gamma \beta_{sp} N / \tau_c \quad (6)$$

其中, 式(1)~式(3)分别对应激光器内载流子密度、主模和边模光子密度的速率方程. 对于边模, 因为 P_{in} 是作为强制项持续加入的, 可认为其光子寿命为无穷大, 所以在式(3)右边表示光子损耗的部分(第 2 项)中, 不应考虑 P_{in} . J 为激光器注入电流密度, N 为载流子密度, P_1 为激光器主模光子密度, P_2 为激光器边模光子密度, P_{in} 为注入信号光光子密度, ν_g 为群速度, e 为电子电荷量, d 为有源区厚

*上海市教委青年基金资助项目(02GQ20)

Tel: 021-65683144 Email: junshanma@163.com

收稿日期: 2004-06-07

度, a_1 、 a_2 为增益系数, N_t 为透明载流子浓度, ϵ_{11} 、 ϵ_{22} 为自饱和系数, ϵ_{12} 、 ϵ_{21} 为互饱和系数, Γ 为限制因子, β_{sp} 为自发辐射因子, τ_c 为载流子寿命, τ_{p1} 为主模光子寿命, τ_{p2} 为边模光子寿命.

在半导体激光器建立起稳定振荡以后, 由于增益调制效应的作用, 外部注入的信号光将会消耗激光器内载流子, 载流子数的变化导致模折射率和传播常数的变化, 因此产生了相位调制, 可表示为

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \beta_c [\Gamma \nu_g a_1 (N - N_t) - \frac{1}{\tau_{p1}}] \quad (7)$$

式中, β_c 为线宽增强因子, 其余各量同式(1)~(6)中所示.

由式(7)可以得出频率变化 $\delta\nu(t)$ 的表达式

$$\delta\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{\beta_c}{4\pi} [\Gamma \nu_g a_1 (N - N_t) - \frac{1}{\tau_{p1}}] \quad (8)$$

式(8)即为进行分析的基本方程.

2 仿真与分析

从式(1)~式(5), 令 $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{12} = \epsilon_{21} = \epsilon$, $a_1 = a_2 = a$, 速率方程简化为

$$\dot{N} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_c} - \nu_g G [1 - \epsilon P_1 - \epsilon (P_2 + P_{in})] P_1 - \nu_g G [1 - \epsilon P_1 - \epsilon (P_2 + P_{in})] (P_2 + P_{in}) \quad (9)$$

$$\dot{P}_1 = \Gamma \nu_g G [1 - \epsilon P_1 - \epsilon (P_2 + P_{in})] P_1 - \frac{P_1}{\tau_{p1}} + \Gamma \beta_{sp} N / \tau_c \quad (10)$$

$$\dot{P}_2 = \Gamma \nu_g G [1 - \epsilon P_1 - \epsilon (P_2 + P_{in})] (P_2 + P_{in}) - \frac{P_2}{\tau_{p2}} + \Gamma \beta_{sp} N / \tau_c \quad (11)$$

$$G = a(N - N_t) \quad (12)$$

在下面的数值计算中, 各参数取值如表 1.

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
载流子寿命 τ_c	2.2 ns
模式 1 光子寿命 τ_{p1}	1.6 ps
模式 2 光子寿命 τ_{p2}	1.2 ps
增益系数 a	$2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$
透明载流子浓度 N_t	$1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
饱和系数 ϵ	$6.8 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$
群速度 ν_g	$0.75 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
限制因子 Γ	0.4
电子电荷量 e	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
激光器有源区长度 L	250 μm
激光器有源区宽度 w	2.0 μm
激光器有源区厚度 d	0.2 μm
自发辐射因子 β_{sp}	0.004
线宽增强因子 β_c	5

下面以式(8)~(12)为理论模型, 分别讨论半导体激光器的工作电流, 注入信号光功率以及注入信号码

率对频率改变的影响.

2.1 激光器注入电流对频率啁啾的影响

图 1 和图 2 对应注入信号光功率为 10 mW, 码率为 200 Mb/s, 而激光器注入电流分别为 50 mA 和 80 mA 时转换信号光功率和频率随时间的变化情况.

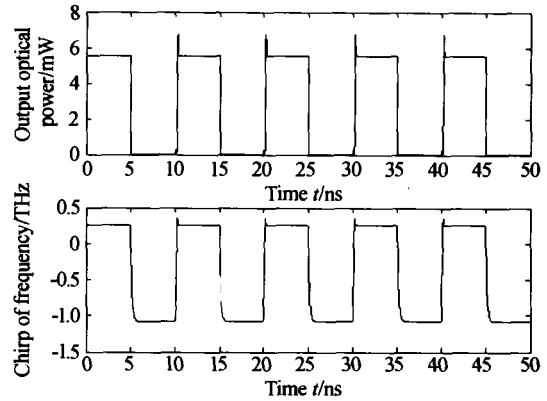


图 1 $I=50 \text{ mA}$, $P_{in}=10 \text{ mW}$, $R_b=200 \text{ Mb/s}$ 时转换信号光的频率啁啾

Fig. 1 Frequency chirp of converted signal in $I=50 \text{ mA}$, $P_{in}=10 \text{ mW}$, $R_b=200 \text{ Mb/s}$

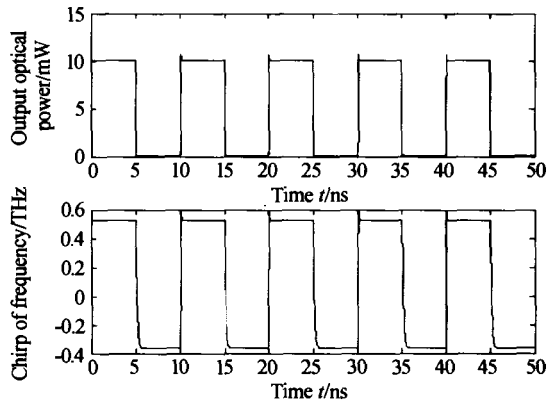


图 2 $I=80 \text{ mA}$, $P_{in}=10 \text{ mW}$, $R_b=200 \text{ Mb/s}$ 时转换信号光的频率啁啾

Fig. 2 Frequency chirp of converted signal in $I=80 \text{ mA}$, $P_{in}=10 \text{ mW}$, $R_b=200 \text{ Mb/s}$

从图上可以看出, 在转换信号光的上升沿, 即由信号“0”变为信号“1”时, 转换信号功率和频率此时在图形上都发生跳变, 出现尖峰, 这就表示在转换信号光的上升沿转换信号光频率产生啁啾, 尖峰的高度即为啁啾的大小, 此处为正啁啾. 仔细观察后得知, 当电流 $I=50 \text{ mA}$ 时, 啁啾大小为 92 GHz, 但电流 $I=80 \text{ mA}$ 时, 啁啾大小为 52 GHz. 由此可知, 适当选择较大的注入电流可以比较有效地抑制频率啁啾, 同时转换信号光功率波形质量可以得到改善.

2.2 注入信号光功率对频率啁啾的影响

图 3~图 5 分别表示注入光功率变为 1 mW、0.5 mW 与 2 mW 时的情况. 激光器注入电流和码率的取值同图 1 的情况.

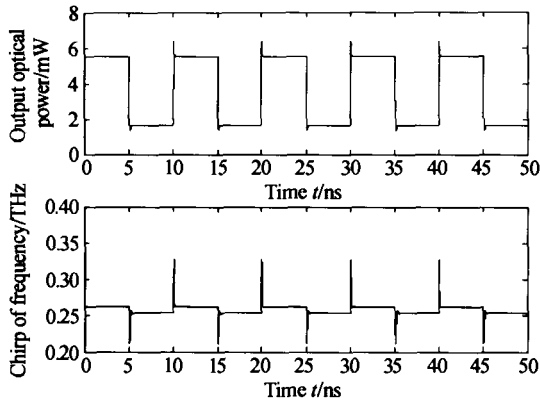


图3 $P_{in}=1\text{ mW}$, $I=50\text{ mA}$, $R_b=200\text{ Mb/s}$ 时转换信号光的频率啁啾

Fig. 3 Frequency chirp of converted signal in $P_{in}=1\text{ mW}$, $I=50\text{ mA}$, $R_b=200\text{ Mb/s}$

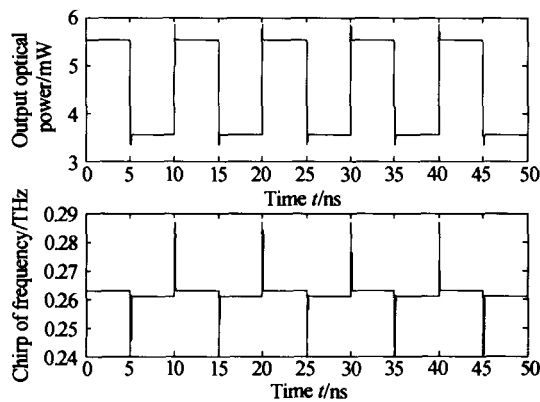


图4 $P_{in}=0.5\text{ mW}$, $I=50\text{ mA}$, $R_b=200\text{ Mb/s}$ 时转换信号光的频率啁啾

Fig. 4 Frequency chirp of converted signal in $P_{in}=0.5\text{ mW}$, $I=50\text{ mA}$, $R_b=200\text{ Mb/s}$

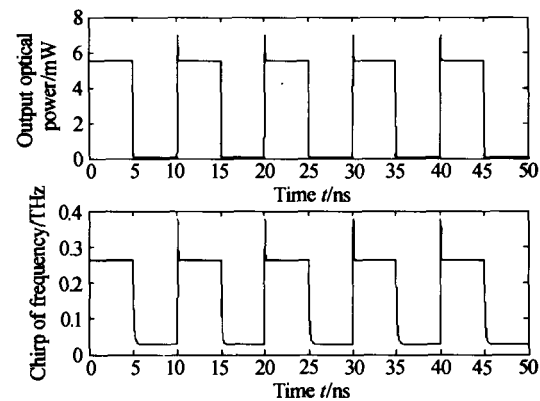


图5 $P_{in}=2\text{ mW}$, $I=50\text{ mA}$, $R_b=200\text{ Mb/s}$ 时转换信号光的频率啁啾

Fig. 5 Frequency chirp of converted signal in $P_{in}=2\text{ mW}$, $I=50\text{ mA}$, $R_b=200\text{ Mb/s}$

从图3可以清楚地看出,当注入信号光功率较小时,在转换信号光上升沿(信号“0”变为信号“1”时)和下降沿(信号“1”变为信号“0”时)处频率均出现啁啾,正负啁啾大小分别为42 GHz和66 GHz,与之相对应的是转换信号消光比劣化严重.当光功率进一步减小时,如图4,啁啾仍为正负两个,大小分别为19 GHz与20 GHz,跟图3相比较可以看

出,在正负两个啁啾都存在的情况下,功率变小,啁啾随之变小,此时转换信号消光比因为注入信号光功率减小而进一步劣化.对于图5的情况,与图1类似,当注入信号光功率增大到一定程度时转换信号的频率啁啾表现出与图3和图4不同的情况,即只出现正啁啾.当光功率增大的情况,如图5,正啁啾大小为108 GHz,跟图1比较可以看出在只有正啁啾的情况下,功率变大啁啾随之变小.由此可以分析,在本论文所给定的参数条件下,当注入信号光功率由1 mW增大到2 mW的过程中,频率啁啾由正负啁啾同时存在过渡到只存在正啁啾,其中负啁啾随功率的增大逐渐消失,正啁啾则逐渐增强.

由此可见,若想同时获得高的消光比和低的频率啁啾,应当适当增大注入信号光的功率.

2.3 码率对频率改变的影响

图6对应的码率为2 Gb/s,此时的激光器注入电流和注入光功率取值与图1情况相同.

结合图1加以比较可以看出,此时转换信号光波形延迟增加,畸变严重,频率在图形上也随之畸变.仔细观察后发现,对于图6的情况,由于码率的增大,频率啁啾随时间变化趋缓,尖峰的高度没有发生明显的改变,频率啁啾保持在92 GHz左右.

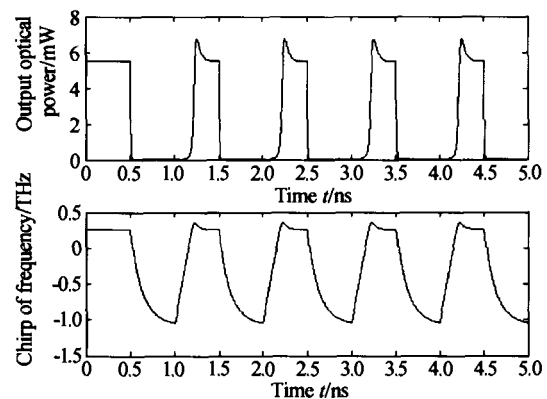


图6 $R_b=2\text{ Gb/s}$, $P_{in}=10\text{ mW}$, $I=50\text{ mA}$ 时转换信号光的频率啁啾

Fig. 6 Frequency chirp of converted signal in $R_b=2\text{ Gb/s}$, $P_{in}=10\text{ mW}$, $I=50\text{ mA}$

3 结论

通过对光参数的分析讨论,可以发现半导体激光器在利用增益调制效应进行波长转换的过程中,有源区内载流子的数量在随着外界注入信号光功率以及激光器注入工作电流大小的改变而发生改变,进而引起输出转换信号光频率的变换,其中在转换信号的上升沿或下降沿,频率会产生啁啾.分析表明,适当选择大的注入电流可以较为有效地抑制频率啁啾,而注入信号光功率对频率啁啾的影响情况则较为复杂.为了同时获得高的转换信号消光比和

低的频率啁啾,可以通过适当增大注入信号光的功率来实现.

参考文献

- 1 李中桂,邱昆. 基于光纤中交叉相位调制的波长转换器研究. 光子学报,2003,32(6):714~717
Li Z G, Qiu K. *Acta Photonica Sinica*, 2003,32(6):714~717
- 2 董建基,张新亮,黄德修. 基于单端耦合 SOA 的波长转换器啁啾特性分析. 光子学报,2005,34(2):255~258
Dong J J, Zhang X L, Huang D X. *Acta Photonica Sinica*, 2005,34(2):255~258
- 3 Yoo S J B. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *J Lighwave Technology*, 1996,14(6): 955~966
- 4 Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen, et al. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *J Lighwave Technology*, 1996, 14(6): 942~954
- 5 Byrav Ramamurthy, et al. Wavelength conversion in WDM networking. *IEEE J on Selected Areas in Com*, 1998,16(7): 1061~1073
- 6 邱绍峰,范戈. 波长共享的 WDM 无源光网络媒质接入控制算法及其性能分析. 光子学报,2004,33(5):560~563
Qiu S F, Fan G. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(5):560~563
- 7 Stephens M F C, Penty R V, White I H. All-optical regeneration and wavelength conversion in an integrated semiconductor optical amplifiers/distributed-feedback laser. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999,11(8): 979~981
- 8 Kyo Inoue, Manabu Yoshino. Bistability and wavelength reshaping in a DFB-LD with side-mode light injection. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995,7(2): 164~166
- 9 陈高庭,瞿荣辉,赵浩,等. 光纤光栅外腔分布布拉格发射激光器中的波长转换. 光学学报, 1998,18(3): 257~261
Chen G T, Qu R H, Zhao H, et al. *Acta Optical Sinica*, 1998,18(3): 257~261
- 10 马军山,耿健新,瞿荣辉,等. 基于光纤光栅外腔半导体激光器增益饱和效应的波长转换实验研究, 中国激光, 2001,28(6): 549~552
Ma J S, Geng J X, Qu R H, et al. *Chinese Journal of Laser*, 2001,28(6): 549~552
- 11 马军山,耿健新,陈高庭,等. 基于光纤光栅外腔激光器的全光波长转换器的阈值转换特性. 光子学报, 2001,30(8): 981~984
Ma J S, Geng J X, Chen G T, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001,30(8): 981~984
- 12 赵同刚,任建华,李蔚,等. 半导体激光器实现波长转换的理论模型分析. 光学学报, 2003,23(9): 1071~1075
Zhao T G, Ren J H, Li W, et al. *Acta Optical Sinica*, 2003,23(9): 1071~1075

Analysis for Frequency Chirp of All-Optical Wavelength Converter Based on Semiconductor Laser

Zhang Wei, Ma Junshan, Chen Jiabi

Optics and Electronic Information Engineering College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093

Received date: 2004-06-07

Abstract The frequency chirp of the converted signal is analyzed by using the rate equation, in addition, the amplified input signal is considered. During the course of the conversion, the amount of carriers in laser cavity will be changed when signal light is injected. As a result, the frequency of the output signal light will be changed, and the chirp of frequency will occur. The results show that higher injected current can restrain the frequency chirp effectively, and higher input optical power can also do that, meanwhile, good extinction ratio is ensured.

Keywords All-optical wavelength conversion; Semiconductor laser; Frequency chirp; Gain modulation

Zhang Wei was born in 1976. He received the Bachelor's degree from Shandong University in 2000. He is currently studying for the Master's degree at University of Shanghai for Science and Technology, and his major research direction is all-optical wavelength conversion in all-optical networks.

