

文章编号: 0253-2239(2003)09-1071-5

# 半导体激光器实现波长转换的理论模型分析

赵同刚 任建华 李 蔚 赵荣华

(北京邮电大学光电检测研究中心, 北京 100876)

**摘要:** 作为自动交换光网络中的核心器件,全光波长转换器的研究是目前的热点。提出了基于半导体激光器实现波长转换的理论模型,采用小信号分析方法,利用速率方程求解了波长转换的频率调制响应特性。并初步研究了不同半导体激光器工作电流、码速、输入信号光功率、增益吸收系数条件对波长转换性能的影响。这对于优化基于半导体激光器的全光波长转换器有一定的参考价值。

**关键词:** 光纤通信;全光波长转换器;半导体激光器;速率方程;增益饱和;调制响应

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## 1 引 言

全光波长转换器 (All optical wavelength converter, AOWC) 作为未来全光网络的一个关键核心器件,在未来网络中占有重要地位<sup>[1]</sup>。全光波长转换器也正是目前国内外研究的热点。根据所采用的非线性器件的不同,全光波长变换的实现方法通常分为以下几类:

1) 基于半导体光放大器(SOA)的全光波长转换器

利用了半导体光放大器的光学非线性效应。主要利用交叉增益调制(XGM)<sup>[2,3]</sup>,交叉相位调制(XPM)<sup>[4]</sup>,四波混频(FWM)<sup>[5]</sup>实现全光波长变换。

2) 基于光纤的全光波长转换器

主要方法有利用光纤的四波混频效应和非线性光纤环境<sup>[6,7]</sup>的交叉相位调制来实现。

3) 基于激光器的全光波长转换器

利用的是激光器的增益饱和效应。它将波长变换介质和所需波长的光源合为一体,结构简单,成本更低。正是这些优点,它是更具有前景的一种波长变换技术。

目前,国外科研机构在基于激光器实现波长变换这领域的研究较多,在实现方式上多采用分布反馈(DFB)激光器和分布布拉格反射(DBR)激光器,另外也有采用光纤光栅外腔半导体激光器完成全光波长转换器的实验报道<sup>[8,9]</sup>。本文针对这些试验现

象,将以速率方程为出发点,采用小信号分析方法为手段,对直接调制下激光器响应特性和波长变换的调制响应特性加以分析比较;最后给出在不同光参量下,波长变换的数值解,重点考察半导体激光器的光参量的差异对波长变换性能带来的影响。

## 2 理论模型

波长转换的实验装置如图 1 所示,外部信号光  $\lambda_s$  经环形器(1→2)入射进半导体激光二极管(Semiconductor laser diode, SLD),当外信号为‘1’时,激光器本身发出的连续光  $\lambda_c$  的光增益下降,激光振荡被抑制,激光熄灭。当外信号为‘0’时,激光器发出连续光  $\lambda_c$ ,结果,激光器的输出随着信号光的变化而变化,并与初始信号反相,完成全光波长变换。另外,半导体激光器的中心波长是可以做到可调谐的,例如:对于分布反馈和分布布拉格反射激光器,改变注入电流<sup>[10]</sup>;对于光纤布拉格光栅外腔半导体激光器(FBG-ECL),通过改变对光纤光栅的应力和温度实现波长的可控调谐<sup>[11,12]</sup>,从而实现全光波长转换器中对转发波长的控制。这一点将在未来智能光网络中很有实用前景。

对于以上物理模型,通常采用速率方程进行描述、分析:<sup>[13,14]</sup>

$$N = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_e} - v_g G_1 (1 - \epsilon_{11} S_1 - \epsilon_{12} S_{in}) S_1 - v_g G_2 (1 - \epsilon_{21} S_1 - \epsilon_{22} S_{in}) S_{in}, \quad (1)$$

$$S_1 = \Gamma v_g G_1 (1 - \epsilon_{11} S_1 - \epsilon_{12} S_{in}) S_1 - \frac{S_1}{\tau_p} + R_{sp}, \quad (2)$$

$$G_1 = a_1 (N - N_t), \quad (3)$$

E-mail: zhaotongang@263.net

收稿日期: 2002-07-11; 收到修改稿日期: 2002-10-21

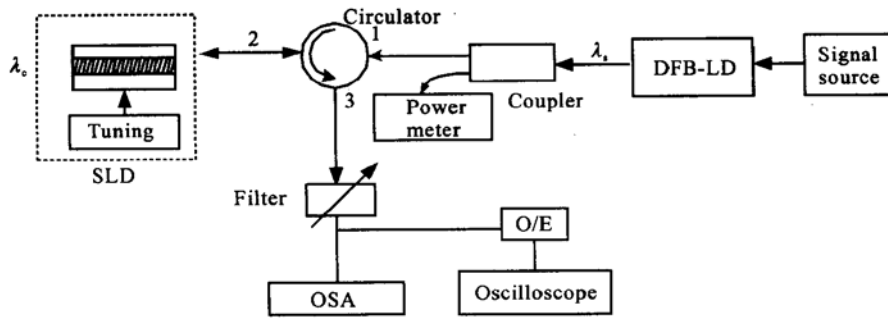


Fig. 1 Experiment setup for wavelength conversion

$$G_2 = a_2(N - N_t), \quad (4)$$

$$R_{sp} = \Gamma \beta_{sp} N / \tau_e, \quad (5)$$

其中  $J$  为激光器工作电流密度,  $N$  为载流子密度,  $S_1$  为激光器出射光子密度,  $S_{in}$  为激光器入射光子密度,  $v_g$  为群速度,  $e$  为电子电荷量,  $d$  为有源区厚度,  $a_1$ 、 $a_2$  为增益系数,  $N_t$  为透明载流子密度,  $\epsilon_{11}$ 、 $\epsilon_{22}$  为自饱和系数,  $\epsilon_{12}$ 、 $\epsilon_{21}$  为互饱和系数,  $\Gamma$  为限制因子,  $\beta_{sp}$  为自发辐射因子,  $\tau_e$  为载流子寿命,  $\tau_p$  为光子寿命。

### 3 调制响应

#### 3.1 $S_{in} = 0$ , 无信号光注入

(1) 式 (2) 式简化为

$$\dot{N} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_e} - v_g G_1 (1 - \epsilon_{11} S_1) S_1, \quad (6)$$

$$\dot{S} = \Gamma v_g G_1 (1 - \epsilon_{11} S_1) S_1 - \frac{S_1}{\tau_p} + R_{sp}, \quad (7)$$

(6) 式 (7) 式正是半导体激光器的耦合速率方程。

忽略自发辐射对激射模式的贡献,  $R_{sp} = 0$ ; 同时忽略光子注入在有源区之外的损耗, 即  $\Gamma = 1$ 。

(6) 式 (7) 式的稳态解满足方程

$$\frac{J_0}{ed} - \frac{N_0}{\tau_e} - v_g G_1 (1 - \epsilon_{11} S_{10}) S_{10} = 0, \quad (8)$$

$$v_g G_1 (1 - \epsilon_{11} S_{10}) S_{10} - \frac{S_{10}}{\tau_p} = 0, \quad (9)$$

利用小信号分析方法来分析调制响应特性, 调制电流  $J$ 、载流子密度  $N$ 、光子密度  $S_1$  的表达式为

$$J = J_0 + j \exp(i\omega t), \quad (10)$$

$$N = N_0 + n \exp(i\omega t), \quad (11)$$

$$S_1 = S_{10} + s_{10} \exp(i\omega t), \quad (12)$$

其中  $J_0$ 、 $N_0$ 、 $S_{10}$  是稳态值,  $j \exp(i\omega t)$ 、 $n \exp(i\omega t)$ 、 $s_{10} \exp(i\omega t)$  是随时间变化的微小量。

将(10)式~(12)式代入(6)式(7)式中, 忽略二阶小量, 取  $\epsilon_{11} = 6.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau_e = 2.2 \text{ ns}$ ,  $\tau_p = 1.6 \text{ ps}$ ,  $a_1 = 2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^2$ ,  $N_t = 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $v_g = 0.75 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $S_{10} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ [15]后得到

$$s_{10} \approx \frac{(j/ed) v_g a_1 (1 - \epsilon_{11} S_{10}) S_{10}}{v_g a_1 (1 - \epsilon_{11} S_{10}) S_{10} / \tau_p - \omega^2 + i\omega / \tau_e + v_g a_1 (1 - \epsilon_{11} S_{10}) S_{10} j}, \quad (13)$$

我们最感兴趣的是调制响应  $s_{10}(\omega)/j(\omega)$ , 由(13)式, 对其分母求最小值, 可得  $\omega_r$  的表达式

$$\omega_r \approx \sqrt{\frac{v_g a_1 (1 - \epsilon_{11} S_{10}) S_{10}}{\tau_p}}, \quad (14)$$

$\omega_r$  表征了该器件的最高调制速率, 增加  $\omega_r$ , 即扩展调制响应的平坦区, 这对实际应用具有重要意义。

#### 3.2 $S_{in} \neq 0$ , 外部信号光注入

忽略自发辐射对激射模式的贡献, 令  $\Gamma = 1$ ,  $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon$ ,  $\epsilon_{12} = \epsilon_{21} = 2\epsilon$ ,  $a_1 = a_2 = a$ ,  $\dot{N}$ 、 $\dot{S} = 0$ [16] 则载流子密度, 光子密度的稳定解应满足方程

$$\frac{J}{ed} - \frac{N_0}{\tau_e} - v_g G (1 - \epsilon S_{10} - 2\epsilon S_{in0}) S_{10} -$$

$$v_g G (1 - 2\epsilon S_{10} - \epsilon S_{in0}) S_{in0} = 0, \quad (15)$$

$$v_g G (1 - \epsilon S_{10} - 2\epsilon S_{in0}) S_{10} - \frac{S_{10}}{\tau_p} = 0, \quad (16)$$

$$G = a(N_0 - N_t), \quad (17)$$

由(16)式, 得到

$$\frac{1}{\tau_p} = v_g G (1 - \epsilon S_{10} - 2\epsilon S_{in0}), \quad (18)$$

仍采用小信号分析方法来分析调制响应特性:

$$N = N_0 + n \exp(i\omega t), \quad (19)$$

$$S_1 = S_{10} + s_{10} \exp(i\omega t), \quad (20)$$

$$S_{in0} = S_{in0} + s_{in} \exp(i\omega t), \quad (21)$$

同上分析方法, 将(19)式~(21)式代入(1)式、(2)式中, 化简后得到

$$s_{10} \approx \frac{2\varepsilon(i\omega + K) + v_g a(1 - 4\varepsilon S_{10} - 2\varepsilon S_{in0}) S_{10} / \tau_p}{v_g a(1 - 2\varepsilon S_{10} - 4\varepsilon S_{in0}) S_{10} / \tau_p + \omega^2 - i\omega / K + v_g a(N_0 - N_1) \varepsilon S_{10}} s_{in}, \quad (22)$$

其中

$$K = \frac{1}{\tau_e} + v_g a(1 - \varepsilon S_{10} - 2\varepsilon S_{in0}) S_{10} + v_g a(1 - 2\varepsilon S_{10} - \varepsilon S_{in0}) S_{in0}, \quad (23)$$

$$\omega_r \approx \sqrt{\frac{v_g a(1 - 2\varepsilon S_{10} - 4\varepsilon S_{in0}) S_{10}}{\tau_p}}, \quad (24)$$

比较(14)式与(24)式, 可以看出波长变换器的小信号调制响应特性与对半导体激光器进行直接调制的频率响应特性在表达式的形式上一致。从(24)式看出, 要扩展调制响应的平坦区, 使器件工作在更高速率, 可采用增加增益系数  $a$  的值, 降低光子寿命  $\tau_p$ , 或者使激光器工作在高光子密度状态的方法。以上几种方案都将是我们在实际应用中要重点考察和论证的。因为, 选用合理的参量, 不仅使激光器工作在最佳状态, 而且还可以得到高的  $\omega_r$ 。

#### 4 波长变换的数值解和讨论

从(1)式~(5)式, 令  $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon$ ,  $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = 2\varepsilon$ ;  $a_1 = a_2 = a$ ; 方程化简为

$$N = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_e} - v_g G(1 - \varepsilon S_1 - 2\varepsilon S_{in}) S_1 - v_g G(1 - 2\varepsilon S_1 - \varepsilon S) S_{in}, \quad (25)$$

$$S = \Gamma v_g G(1 - \varepsilon S_1 - \varepsilon S_{in}) S_1 - \frac{S_1}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta_{sp} N}{\tau_e}, \quad (26)$$

$$G = a(N - N_1), \quad (27)$$

其中饱和系数  $\varepsilon = 6.8 \times 10^{-17} \text{ cm}^{-3}$ , 载流子寿命  $\tau_e = 2.2 \text{ ns}$ , 光子寿命  $\tau_p = 1.6 \text{ ps}$ , 增益系数  $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ , 透明载流子浓度  $N_1 = 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 群速度  $v_g = 0.75 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 限制因子  $\Gamma = 0.4$ , 电子的电荷量  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 激光器有源区长度  $L = 250 \text{ } \mu\text{m}$ 、宽度  $w = 2.0 \text{ } \mu\text{m}$ , 厚度  $d = 0.2 \text{ } \mu\text{m}$ , 自发辐射因子  $\beta_{sp} = 0.004^{[15]}$ 。

##### 4.1 半导体激光器的工作电流、注入信号光功率对波长变换的影响

从图2和图3看出, 对于给定的入射光功率下, 增大激光器注入工作电流, 波长转换后的波形有明显的改善。从波长变换的机理分析, 输入信号为‘0’时, 激光器开始建立稳定的振荡, 它的输出相对于输入存在一定时间延迟, 增大工作电流, 延迟时间减小, 图中

也清楚地反映了这一现象; 同时, 从计算结果看出, 在激光振荡稳定前, 存在张弛振荡现象和一明显尖峰, 这是由激光器内部光电相互作用所带来的固有的不稳定特性造成的, 增加工作电流, 会使张弛振荡受到抑制, 利于激光器的稳定工作; 但是, 增大电流, 由  $P-I$  曲线, 激光器的输出功率增加, 这将使消光比恶化, 同时会降低接收机的灵敏度, 这是一对矛盾。综上所述, 合理地选择工作电流, 对于转换器件工作在一个特定状态有重要意义。

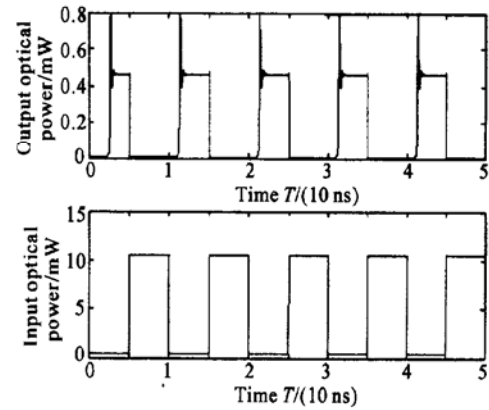


Fig. 2 Calculated waveform of signal after wavelength conversion in  $I=18 \text{ mA}$ ,  $R_b=200 \text{ Mb/s}$ ,  $P=5 \text{ mW}$

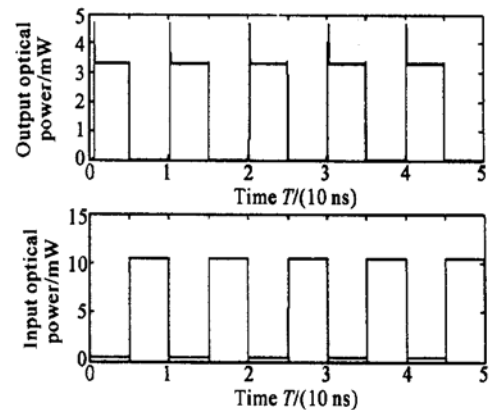


Fig. 3 Calculated waveform of signal after wavelength conversion in  $I=54 \text{ mA}$ ,  $R_b=200 \text{ Mb/s}$ ,  $P=5 \text{ mW}$

从图3和图4, 可以对比不同的输入信号光功率对波长变换带来的影响。当工作电流一定, 显然, 入射光功率降低, 消光比恶化。从原理上分析, 当工作电流一定, 增加输入光功率, 将加速消耗激光介质中的载流子, 从而使得发生波长转换的激光器加速熄灭, 同时输入光得到放大, 消光比高; 而较低的入

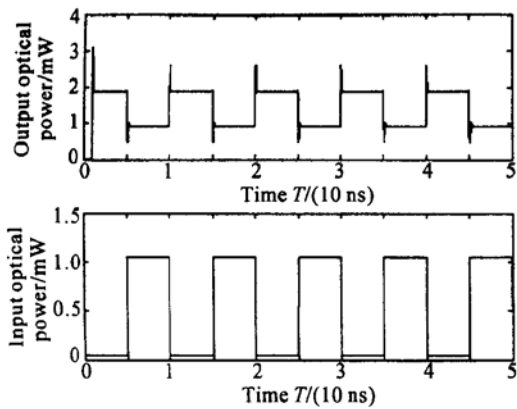


Fig. 4 Calculated waveform of signal after wavelength conversion in  $I = 54 \text{ mA}$ ,  $R_b = 200 \text{ Mb/s}$ ,  $P = 0.5 \text{ mW}$

射光功率,可能在输入为‘1’时,激光器不能熄灭,仍有输出,造成消光比的恶化。所以,在实际应用中,应考虑为获得较高的消光比,适当加大入射光功率,并在输出端,加入可调谐光滤波器,将放大的输入光信号滤掉,得到波长转换后的信号光。

#### 4.2 输入信号调制响应速度对波长变换信号产生的影响

比较图3和图5,可以得到输入信号调制响应速度对波长变换后信号产生的影响。当在同样的工作电流和输入信号光功率情况下,明显看出调制速率越高,信号畸变越严重,光电延迟特性愈恶化。这是因为调制速率的上限是由器件的增益饱和、增益恢复速率决定,即 $\omega_r$ 决定。从(24)式看出, $\omega_r$ 和激光器的结构参量有关。在具体应用中,如果利用光纤光栅外腔半导体激光器作为波长变换的介质,它的腔长将影响光子寿命 $\tau_p$ ,从而影响 $\omega_r$ ,即调制速率。显然,器件的结构参量直接影响到它所实现的功能,这对于我们今后的研究有重要意义。

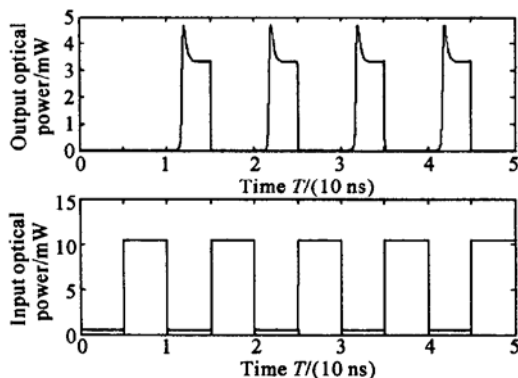


Fig. 5 Calculated waveform of signal after wavelength conversion in  $I = 54 \text{ mA}$ ,  $R_b = 2 \text{ Gb/s}$ ,  $P = 5 \text{ mW}$

#### 4.3 增益系数对波长转换信号的影响

以上讨论基于增益系数 $a_1 = a_2 = a$ 的情况,实际上,增益系数的大小是和波长有关的,考察实际激光器的增益曲线,发现波长间隔越大,增益系数相差越大。 $a_1 = a_2 = a$ 仅适合于输入信号光波长同所要变换的光波长间隔较小的情况。在实际的波长转换试验中,波长不同,即 $a_1 \neq a_2$ ,甚至相差很大,图6正是在 $a_1 = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ,  $a_2 = 2.5 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 取值下数值计算后得到的波长变换信号波形。

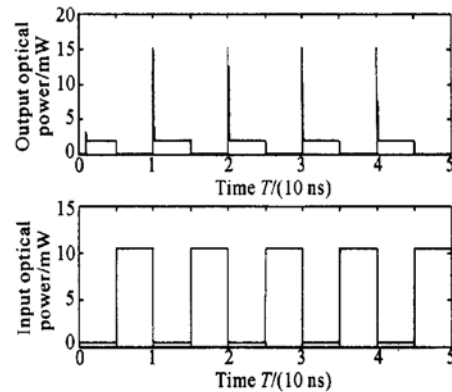


Fig. 6 Calculated waveform of signal after wavelength conversion in  $a_1 \neq a_2$

比较图3和图6,可以看出图3是在 $a_1 = a_2$ 下计算的结果,即波长转换间隔很窄的情况,图6则是模拟了波长间隔较宽的情况,很明显,相比图3的结果,图6中变换后的信号波形畸变严重。从原理上分析,是由于增益系数由增益曲线决定,波长间隔增大,交叉增益饱和作用减弱,造成转换效率的降低。交叉增益饱和作用是我们研究波长转换的工作范围的理论基础。

综上所述,激光器工作电流,输入信号光功率,信号调制速率,激光器增益系数对基于半导体激光器实现波长转换会产生影响。可以看到,以上所得数值解的结果和Durhuus,陈高庭的试验结论<sup>[8,9]</sup>也是基本吻合的。光参量的差异和波长转换的效率息息相关,这将是我们在今后的波长转换试验中要重点研究和分析的。

**结论** 全光波长转换器将是未来全光网的核心器件之一。本文针对基于半导体激光器实现波长转换的实验方案,建立理论分析模型,通过小信号分析方法得到波长转换器的频率调制响应特性,并和直接调制下的激光器响应特性进行了比较。要扩展波长转换调制响应的平坦区,可增加增益系数 $a$ 的值,降低光子寿命 $\tau_p$ ,并使激光器工作在高光子密度状

态。最后,根据速率方程,初步分析半导体激光器的工作电流,输入信号光功率,输入信号的调制速率等参量对波长转换信号的影响。显然,合理的调整光参量可以得到更高的波长转换效率。这对于优化设计基于半导体激光器的全光波长转换器十分重要。

### 参 考 文 献

- 1 Yoo S J B. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 955~ 966
- 2 Willner A E, Shieh W. Optical spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting single stage, fanout, and cascability. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5): 771~ 781
- 3 Joergensen C, Danielsen S, Stubkjaer K *et al.*. All-optical wavelength conversion at bit rates above 10 Gb/s using semiconductor optical amplifier. *IEEE J. Select Topics in Quantum Electron.*, 1997, **3**(5): 1168~ 1179
- 4 Durhuus T, Joergensen C, Mikkelsen B *et al.*. All optical wavelength conversion by SOA's in Mach-Zehnder configuration. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1): 53~ 55
- 5 Yates J M, Lacey J P R, Rumsewicz M P *et al.*. Performance of networks using wavelength converters based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 782~ 791
- 6 Wang Ding, Golovchenko E A, Pilipetskii A N *et al.*. Nonlinear optical loop mirror based on standard communication fiber. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(4): 642~ 646
- 7 Bigo S, Desurvire E, Desruelle B. All-optical RZ-to-NRZ format conversion at 10 Gbit/s with nonlinear optical loop mirror. *IEEE J. Electron. Lett.*, 1994, **30**(22): 1868~ 1869
- 8 Durhuus T, Pedersen R J S, Mikkelsen B *et al.*. Optical wavelength conversion over 18 nm at 2.5 Gb/s by DBR-Laser. *J. IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(1): 86~ 88
- 9 Chen Gaoting, Qu Ronghui, Zhao Hao *et al.*. Wavelength conversion in a DBR laser with fiber Bragg grating external cavity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(3): 257~ 261 (in Chinese)
- 10 Yasaka H, Ishii H, Takahata K *et al.*. Broad-range wavelength conversion of 10 Gbit/s signal using a superstructure grating distributed Bragg reflector laser. *J. Electron. Lett.*, 1994, **30**(2): 133~ 134
- 11 Dong Xinyong, Liu Zhiguo, Kai Guiyun *et al.*. A novel method to chirp fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(10): 1275~ 1277 (in Chinese)
- 12 Pan Zhongqi, Yang Jinqiang, Ye Yabing *et al.*. Programmable wide band wavelength tuning external-cavity semiconductor laser. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(2): 221~ 225 (in Chinese)
- 13 Yamada M. Transverse and longitudinal mode control in semiconductor injection lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**(9): 1365~ 1380
- 14 Agrawal G P. Gain nonlinearities in semiconductor lasers: theory and application to distributed feedback lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **QE-23**(6): 860~ 868
- 15 Cartledge J C, Srinivasan R C. Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(5): 852~ 860
- 16 Takahashi Y, Neogi A, Kawaguchi H. Nonlinear optical gains in polarization switching of semiconductor lasers. *10th Intern. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials*. Tsukuba, Japan, 11~ 15 May 1998, THP 59: 745~ 748

## Theoretical Model Analysis of Wavelength Conversion Based on Semiconductor Laser

Zhao Tonggang Ren Jianhua Li Wei Zhao Ronghua

(Research Center of Opto-Electronic Inspection, Beijing University of Posts and Telecomm., Beijing 100876)

(Received 11 July 2002; revised 21 October 2002)

**Abstract:** As a key device in ASON (automatic switched optical networks), the study on all optical wavelength converters is becoming a very important project. A theoretical model of wavelength conversion based on semiconductor laser is established. The frequency modulation response of wavelength conversion is discussed by using rate equation under the small-signal analysis. The characteristics of wavelength conversion are analyzed in different optical parameters including the injection current, signal average power, gain coefficient and so on. Those results are useful to optimal design of the wavelength converter based on semiconductor laser.

**Key words:** optical fiber communication; all optical wavelength converter; semiconductor laser; rate equation; gain saturation; modulation response