

文章编号: 1001-3806(2005)02-0216-03

## 半导体激光器实现波长转换的理论和实验分析

赵同刚<sup>1</sup>, 任建华<sup>\*</sup>, 赵荣华<sup>1</sup>, 饶 岚<sup>1</sup>, 王丽丽<sup>1</sup>, 林金桐<sup>1</sup>, 吴 炜<sup>2</sup>, 郭永新<sup>2</sup>

(1. 北京邮电大学 北邮-安立光电检测研究中心, 北京 100876; 2. 辽宁大学 物理系, 沈阳 110036)

**摘要:** 作为自动交换光网络中的核心器件, 全光波长转换器在网络中发挥着重要作用。建立了半导体激光器实现波长转换的理论模型, 利用速率方程, 数值求解了半导体激光器进行波长转换的特性; 自行搭建了一套利用光纤光栅外腔半导体激光器进行全光波长转换的实验平台, 并对实验结果进行了研究。发现试验结果和理论分析结果是相当吻合的。分析表明, 降低光子寿命, 优化外腔结构将是该器件在未来智能光网中实用的关键。

**关键词:** 全光波长转换; 半导体激光器; 速率方程; 增益饱和

**中图分类号:** TN929.1      **文献标识码:** A

### Theoretical and experimental analysis of wavelength conversion based on semiconductor laser

ZHAO Tong-gang<sup>1</sup>, REN Jian-hua<sup>1</sup>, ZHAO Rong-hua<sup>1</sup>, RAO Lan<sup>1</sup>,  
WANG Li-li<sup>1</sup>, LIN Jin-tong<sup>1</sup>, WU Wei<sup>2</sup>, GUO Yong-xin<sup>2</sup>

(1. BUPT-Anritsu Research Center of Optic-electronic Inspection, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Department of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

**Abstract** As the key apparatus in ASON (automatic switched optical networks), all optical wavelength conversion device plays a very important role. A theoretical model of wavelength conversion based on semiconductor laser is established. Using rate equation, the characteristics of wavelength conversion are analyzed based on numerical solution of theoretical model. A set of experimental equipment using fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser for all optical wavelength conversion are accomplished by ourselves. Experimental results are discussed synchronously. The result of experiment is accordant with theoretical analysis. Research indicates that it is applied key to reduce photon life and optimize the structure of external cavity in future intelligent optical network.

**Key words** all optical wavelength conversion; semiconductor laser; rate equation; gain saturation

## 引 言

近年来, 以 IP 为主的 Internet 业务呈现爆炸性增长, 这种增长趋势不仅改变了 IP 网络层与底层传输网络的关系, 而且对整个网络的组网方式、节点设计、管理和控制带来了深远影响。目前最新提出的智能化网络体系结构自动交换光网络 (automatic switched optical networks, ASON), 可以实现动态波长选路以及对全光网进行有效控制。网络中的核心器件全光波长转换器 (all optical wavelength converter, AOWC) 在解决网络中的波长争用、实现波长动态分配方面发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。根据所采用的非线性器件的不同, 全光波长转换器包括以下几类: (1) 基于半导体光放大器 (SOA)

的 AOWC, 主要利用了 SOA 的交叉增益调制 (XGM)<sup>[2]</sup>, 交叉相位调制 (XPM)<sup>[3]</sup>, 四波混频 (FWM)<sup>[4]</sup> 等效应; (2) 利用光纤四波混频和基于非线性光纤环境的交叉相位调制来实现 AOWC<sup>[5]</sup>; (3) 利用激光器增益饱和特性完成的 AOWC<sup>[6]</sup>。

基于半导体激光器实现 AOWC 将波长变换介质和光源合为一体, 结构简单, 成本更低, 它是更具有前景的一种波长变换技术。特别是光纤光栅外腔半导体激光器 (fiber Bragg grating external cavity semiconductor lasers, FBG-ECL) 还具有窄线宽、高边模抑制比的优点。且利用布喇格波长随应力和温度改变而改变的特性<sup>[7]</sup>, 还可制作出激射波长可精密调谐的外腔半导体激光器。从而制作出可调谐全光波长转换器, 高性价比使它在全光通信系统中具有广阔的发展前景。作者将以速率方程为出发点, 采用小信号分析方法为分析手段, 对这种波长转换的模型和实验进行研究。

## 1 理论模型

图 1 所示为半导体激光器实现波长变换的实验装

基金项目: 沈阳市科委基金资助项目 (1022030-1-01)

作者简介: 赵同刚 (1972-), 男, 博士研究生, 目前主要从事全光波长变换及全光网的研究。

\* 通讯联系人。Email: R\_JH2000@sohu.com

收稿日期: 2004-03-03 收到修改稿日期: 2004-06-23

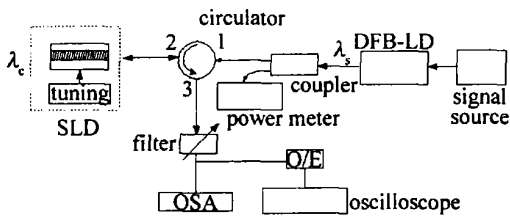


Fig 1 Experiment setup for wavelength conversion

置,外部信号光  $\lambda_c$  经环形器入射进半导体二极管激光器 (semiconductor laser diode SLD), 当外信号为“1”时,激光器本身发出的连续光  $\lambda_s$  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  $\lambda_s$ , 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。

对以上物理模型,采用速率方程进行描述、分析<sup>[8]</sup>:

$$\dot{N} = J/e d - N/\tau_c - v_g a_1 (N - N_t) (1 - \epsilon_{11} S_1 - \epsilon_{12} S_{in}) S_1 - v_g a_2 (N - N_t) (1 - \epsilon_{21} S_1 - \epsilon_{22} S_{in}) S_{in} \quad (1)$$

$$\dot{S}_1 = \Gamma v_g a_1 (N - N_t) (1 - \epsilon_{11} S_1 - \epsilon_{12} S_{in}) S_1 - S_1/\tau_p + \Gamma \beta_{sp} N/\tau_c \quad (2)$$

式中,  $J$  为偏置电流密度;  $N$  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;  $\tau_c$  为载流子寿命;  $\tau_p$  为光子寿命。

外部信号光注入,若忽略自发辐射,采用小信号分析方法,令  $J = J_0 + j e^{i\omega t}$ ,  $N = N_0 + n e^{i\omega t}$ ,  $S_1 = S_{10} + S_1 e^{i\omega t}$  可以得到波长转换器的最高调制响应速率<sup>[9]</sup>:

$$\omega_r \approx \sqrt{\frac{v_g a (1 - 2\epsilon S_{10} - 4\epsilon S_{in0}) S_{10}}{\tau_p}} \quad (3)$$

为获得高  $\omega_r$ , 可采用增加增益系数  $a$  的值,降低光子寿命  $\tau_p$ , 或使激光器工作在高光子密度状态的方法。

在利用速率方程 (1) 式、(2) 式进行仿真之前,先重点考察一下 FBG-ECL 的结构和模型。为更好地描述光纤光栅在 FBG-ECL 中频谱特性,应用模耦合理论<sup>[10-11]</sup>, 可以得到光纤光栅反射率:

$$r_g = -K \sinh(rL) / [-r \cosh(rL) + s \sinh(rL) \sigma] \quad (4)$$

对 FBG-ECL 阈值特性、边模抑制比的分析,常采用等效腔近似的手段<sup>[12]</sup>, 将外腔视作一个单端口网络,其等效反射系数可写为:

$$r_{eff} = \frac{E_b}{E_f} = \frac{r_2 + \eta r_g \exp(-i4\pi L_{ex}/\lambda)}{1 + \eta r_2 r_g \exp(-i4\pi L_{ex}/\lambda)} \quad (5)$$

$$\text{激光阈值条件: } \Gamma g_{th} = \alpha_{in} + \frac{1}{2L_{in}} \ln\left(\frac{1}{r_1 |r_{eff}|^2}\right) \quad (6)$$

式中,  $\eta$  是光纤和半导体激光器的功率耦合系数,  $K, \sigma$  分别为直流和交流耦合系数,  $r^2 = K^2 - \sigma^2$ ,  $L$  是光栅长

度,  $L_{ex}$  是外腔长度。

由 (4) 式 ~ (6) 式, 峰值反射率越大, 阈值增益  $\Gamma g_{th}$  越低, 相应的, 器件阈值电流减小, 相同偏置电流, 输出功率增加。从波长变换的物理机理分析, 增大偏置电流, 可减弱激光器内部光电相互作用所带来的固有的不稳定特性, 张弛振荡也受到抑制, 利于其稳定工作。

在采用等效腔近似分析方法下, 可以确定 (1) 式、(2) 式中的各个参数, 令:  $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon = 6.8 \times 10^{-17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\epsilon_{12} = \epsilon_{21} = 2\epsilon$ ,  $a_1 = a_2 = a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ,  $\tau_c = 2.2 \text{ ns}$ ,  $\tau_p = 5 \text{ ps}$ ,  $N_t = 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $v_g = 0.75 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\Gamma = 0.4$ ,  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 激光器内腔的长、宽、高分别为  $L_{in} = 250 \mu\text{m}$ ,  $w = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $d = 0.2 \mu\text{m}$ ,  $\beta_{sp} = 0.004$ <sup>[9]</sup>。可以得到偏置电流  $I = 18 \text{ mA}$ , 调制速率  $R_b = 200 \text{ bit/s}$  入射平均功率  $\bar{P} = 5 \text{ mW}$  下, 波长变换前后的信号波形如图 2 所示。

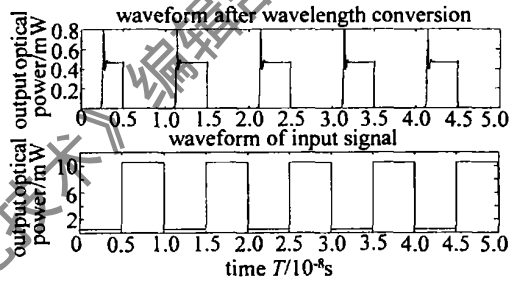


Fig 2 Calculated waveform of signal after wavelength conversion

另外, 根据 (1) 式、(2) 式, 还可以分析不同激光器工作电流, 输入信号光功率, 信号调制速率, 对波长转换产生的影响。这些光参数的差异和波长转换的效率息息相关, 这将在波长转换理论和实验中重点研究和分析的。

## 2 实验结果与讨论

根据图 1 所示, 笔者自行搭建了一套利用光纤光栅外腔半导体激光器实现波长变换的实验平台, 其中光发送部分以及光接收模块均由本实验室自行设计制作。光纤光栅外腔半导体激光器管芯由海特光电有限责任公司提供, 选用的是中心波长为  $1552.35 \text{ nm}$  的光纤光栅, 其峰值反射率为  $50\%$ , 内腔长度为  $L_{in} = 250 \mu\text{m}$ , 外腔长度  $L_{ex} = 50 \text{ cm}$ , 耦合效率  $\eta = 0.8$  阈值电流为  $13 \text{ mA}$ ,  $50 \text{ mA}$  偏置电流下的输出功率为  $500 \mu\text{W}$ 。图 3a 和图 3b 分别是利用光谱分析仪测得的信号光源光谱和无注入光信号下, 偏置电流为  $50 \text{ mA}$  时外腔半导体激光器的发射光谱。图 3c 是在环形器第 3 口测得的波长转换后的输出光谱。利用可调谐光滤波器, 将中心波长为  $1549.8 \text{ nm}$  的注入信号光滤去后, 经过光电变换后, 得到转换后的电信号。如图 3d 所示, 上方波形 1 是经光波长转换后, 外腔半导

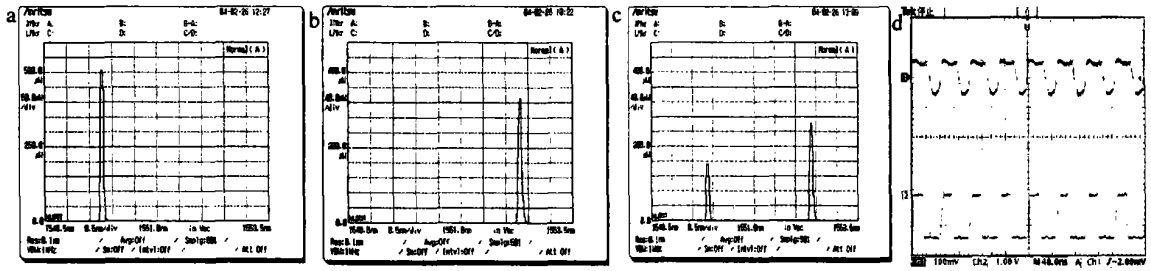


Fig 3 a—spectrum of the input signal source b—spectrum of external cavity laser with a bias current of 50mA c—spectrum of the output after wavelength conversion d—the output electrical signal after wavelength conversion and signal for monitor

体激光器输出所携带的原注入光信号的电信息,由于半导体激光器实现波长变换的原理利用的是激光器增益饱和效应,故波形 1 中的电信号同原注入信号反相。波形 2 是从注入光信号发生器提取监控信号,这里提取的监控信号同注入外腔半导体激光器的光信号相位也相反。结果,在示波器上可清楚地看到变换后信号(波形 1)和监控信号(波形 2)的同相变化。

实验中发现激光器工作电流,输入信号光功率都会对波长转换产生影响。如:给定的入射光功率下,增大激光器注入偏置电流,波长转换的波形有明显改善。合理地选择 FBG-ECL 的工作电流等参数,对于全光转换器有重要意义。另外如图 3d 所示,波长转换后的电信号的上升时间较长,根据 (3) 式,要使波长转换器得到高调制响应速率,目前有效的改进方法是降低光子寿命  $\tau_p$ 。减小外腔长度,提高耦合效率,优化外腔的结构是该器件实现在高速、大容量全光网中应用的关键。限于篇幅,关于光子寿命等细节对波长转换特性影响的分析将在另文中讨论。

### 3 结论

全光波长转换器将是未来全光网的核心器件之一。本文中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,并自行搭建了一套基于光纤光栅外腔半导体激光器实现波长转换的实验平台。光纤光栅外腔半导体激光器实现波长变换还有一个突出优点,就是可以通过调谐光纤光栅的中心波长,从而实现全光波长转换器中对转发波长的可控转换。这将

在未来智能光网络中有很好的实用前景。

### 参考文献

- [1] YOO S, J B W. wavelength conversion technologies for WDM network applications [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1996, 14(6): 955~966.
- [2] JOERGENSEN C, DAN ELSSEN S, STUBK J AER K *et al*. All optical wavelength conversion at bit rates above 10 Gbit/s using semiconductor optical amplifier [J]. IEEE J Select Topics in Quantum Electron, 1997, 3(5): 1168~1179.
- [3] DURHUUS T, JOERGENSEN C, M KKELESEN B *et al*. All optical wavelength conversion by SOA's in Mach-Zehnder configuration [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1994, 6(1): 53~55.
- [4] YATES JM, LACEY J P R, RUMSEW ICZ M P *et al*. Performance of networks using wavelength converters based on four wave mixing in semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1999, 17(5): 782~791.
- [5] WANG D, GOLOVCHENKO E A, P LIPETSKII A N *et al*. Nonlinear optical hop mirror based on standard communication fiber [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1997, 15(4): 642~646.
- [6] 陈高庭, 瞿荣辉, 赵浩 *et al*. 光纤光栅外腔分布喇格反射激光器中的波长转换 [J]. 光学学报, 1998, 18(3): 257~261.
- [7] 陈长勇, 乔学光, 贾振安 *et al*. 一种新颖的光纤光栅应变与温度双参量传感器 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(8): 787~790.
- [8] AGRAWAL G P. Gain nonlinearities in semiconductor lasers theory and application to distributed feedback lasers [J]. IEEE J Q E, 1987, QE23(6): 860~868.
- [9] 赵同刚, 任建华, 李蔚 *et al*. 半导体激光器实现波长转换的理论模拟分析 [J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1071~1075.
- [10] MCCALL M. On the application of coupled mode theory for modeling fiber Bragg gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(2): 236~242.
- [11] 夏光琼, 吴正茂, 陈建国. 光纤光栅的长度对其峰值反射率的影响 [J]. 激光技术, 2002, 26(2): 106~107.
- [12] KAKUCHI DA H, OHTSUBO J. Characteristics of a semiconductor laser with external feedback [J]. IEEE J Q E, 1994, QE30(9): 2087~2097.

(上接第 206 页)

到外界环境(太阳光以及其它自然光等)的干扰。如采集其它特征信号,如功率谱信号等,则容易克服外界环境干扰,增大探测距离。

### 3 结论

从实验结果以及对实验结果的分析中,可以得出如下结论:在水中存在气泡的情况下,其后向光散射特性有了明显的变化。采取一定的措施,可以在一定距

离上探测到后向光散射信号。另外,后向光散射信号的强度除与激光光源的质量有关外,还与探测器类型、气泡幕距离以及气泡密度等关系密切。

### 参考文献

- [1] 张建生, 孙传东, 卢笛. 水中气泡的特性研究 [J]. 西安工业学院学报, 2000, 20(1): 5~6.
- [2] 叶子. 光散射理论及应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 1995. 22~24.
- [3] BOHRON C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York Wiley, 1983. 252~270.