

文章编号: 0258-7025(2001)06-0549-04

基于光纤光栅外腔半导体激光器增益饱和效应的全光波长转换实验研究^{*}

马军山^{**} 耿建新 瞿荣辉 陈高庭 方祖捷

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 对基于光纤光栅外腔半导体激光器增益饱和效应的全光波长转换器的静态与动态特性进行了实验研究。为消除反馈光与转换信号输出光对光源的不利影响及提高光输入、输出信号耦合效率,提出了采用环形器进行信号耦合的光学结构。实验结果表明,转换器件具有高于 30 nm 的波长转换间隔,并可实现波长上、下转换。进行了 155 Mbit/s 伪随机码调制信号的动态波长转换实验。

关键词 全光波长转换,外腔激光器,光纤光栅,增益饱和

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

Experimental Study on All-optical Wavelength Conversion Based on Gain Saturation Effect in a Fiber Bragg Grating External Cavity LD

MA Jun-shan GENG Jian-xin QU Rong-hui CHEN Gao-ting FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The performance of all-optical wavelength converter based on the gain saturation effect in fiber grating external cavity LD is investigated. In order to eliminated the influence of the returned light and converted output light on the input signal source, and to increase coupling efficiency of input signal and output signal, a new optical scheme of converter using optical circulator are proposed. The experiment results show that wavelength conversion range is over 30 nm, and both up- and down-conversion are realized. Dynamic wavelength conversion for 155 Mbit/s NRZ input signal is presented.

Key words all-optical wavelength conversion, external cavity LD, optic fiber grating, gain saturation

1 引言

波分复用(WDM)技术是高速大容量光纤通信的首选技术。在 WDM 通信系统的光交叉连接(OXC)等结点中,当不同光纤中两个相同波长信号进入同一光纤中时,就产生了波长阻塞问题。解决这一问题的有效方法就是采用波长转换技术,即将其中一个信号波长转换到其他波长,从而避免波长阻塞^[1,2]。波长转换技术的另一重要用途是实现不同光网络间的波长匹配,可以把不同波长系列产品统一到同一波长标准上,实现网络间的通信。此外,

通过波长转换,可以增强网络重构、网络管理的灵活性和可靠性^[3]。

目前已提出多种全光波长转换方案。其中较具吸引力的一种是基于半导体光放大器(SOA)的全光波长转换技术,利用 SOA 中交叉增益调制^[4,5]、交叉相位调制^[6]及四波混频效应^[7]实现波长转换,三种方法各有优缺点。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累积,将降低光信号的消光比。针对这个问题,提出了基于激光器的全光波长转换器^[8,9],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。已报道的激光器型波长转换器,均是以 DFB 激光器作为转换器件。本文提出了基于光纤光栅外腔半导体激光器的波长转换方案^[10],与 DFB 方案相比,器件成本低,由于采用了光纤光栅,可以方便地提供满足

^{*} 国家科委攀登计划预研项目、上海市博士后科研项目及上海市重大科技项目资助课题。

^{**} 现在上海理工大学光电学院工作。

收稿日期 2000-01-14;收到修改稿日期 2000-06-30

WDM要求的激光输出,包括波长间隔准确、谱线窄、波长稳定,并可通过光纤光栅波长调谐来改变转换波长。

在文献[10]中,由于实验条件的限制,作者仅报道了波长间隔为8 nm的上波长转换的初步演示结果。本文在原有工作基础上,提出了改进的实验方案,并进行了更为深入的实验研究,包括波长间隔为20 nm的上、下波长转换,波长间隔为30 nm的大范围波长转换及155 Mbit/s伪随机码调制非归零码(NRZ)信号的动态波长转换实验。

2 原理与方案

激光器型波长转换器的工作机理是基于激光介质的增益饱和效应。对于一个在阈值以上工作的激光器,当有波长位于激光介质增益谱范围内的外部光注入到其腔内时,由于增益饱和效应,在激光器振荡波长处的增益将降低。当注入光功率达到一定程度使增益小于损耗时,激光振荡将被抑制,仅有自发辐射存在,输出功率极小。这样,当一幅度调制信号

注入到激光器时,激光器输出就相应被调制,从而将幅度调制信息从输入信号光波长转换到激光器输出波长上,实现波长转换功能。由于转换后的“0”与“1”信号分别对应于激光器的熄灭与振荡,所以转换后的信号消光比非常高,并且与初始信号是反相的。

图1为实验方案原理图。本波长转换器的核心器件是光纤光栅外腔半导体激光器(FBG-ECL)。F-P腔半导体管芯为1.5 μm 波段,其中一端经过光学增透处理,剩余反射率小于0.001。光纤光栅为采用准分子激光与相位掩模板技术制作的光纤Bragg光栅。器件的阈值电流为28 mA,工作电流为30 mA时,边模抑制比高于35 dB。通过光纤环形器完成信号光与转换输出光的耦合输入及输出,与使用3 dB光纤耦合器的方法相比,可以提高转换信号输出功率,并减小转换信号光及光源反馈光对信号光源的影响。环形器的插入损耗,1 \rightarrow 2为1.5 dB,2 \rightarrow 3为1.1 dB。信号光由环形器1端进入与2端相连的FBG-ECL,转换的FBG-ECL输出光由3端输出。图1中的耦合器仅是为实验时测量信号光功率而设置的,实际使用时并不需要。

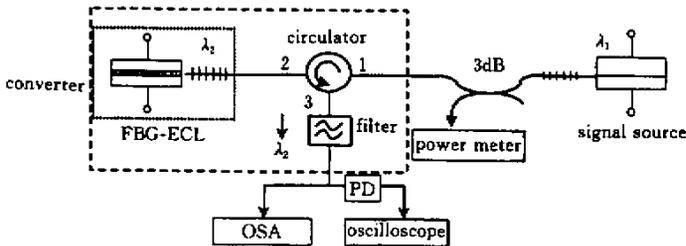


图1 实验方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment setup

3 实验结果与讨论

3.1 静态转换特性

3.1.1 波长上、下转换实验

首先进行由短波长向长波长(1531.44 nm \rightarrow 1551.68 nm)的上波长转换实验,波长间隔为20 nm,在以前的实验中仅进行了间隔为8 nm的转换实验。图2为不同注入信号功率时的输出端光谱测量结果。在输出端未使用光滤波器,所以可以观察到输入信号光谱,它是初始入射信号在半导体增益介质中被放大,又经管芯另一端面反射回来的一部分,经历了放大与损耗过程。由图2可看出,随着注入信号功率的增大,由于增益饱和效应的作用,外腔激光器的输出功率逐渐降低,当 P_i 为50 μW 时,光谱仪测得的激光器输出峰值功率为-28 dBm,当增大为

70 μW 时,峰值功率减小为-35.5 dBm,即注入功率增大1.5 dB,激光器输出功率降低7.5 dB。当注入信号功率达到250 μW 时,激活介质进入深度饱和状态,此时增益已小于损耗,激光输出被完全抑制,在1551.68 nm波长处,只有功率小于-55 dBm的内腔模输出。注入光功率从50 μW 增大到250 μW ,仅仅变化7 dB,而激光器输出却降低了27 dB,这就是说,对于消光比为7 dB的注入信号,转换后信号的消光比可高达27 dB,消光比得到了显著的改善,远远大于ITU标准中要求的最小值8.2 dB。当然,这是静态条件下测试的结果,对于动态调制信号,消光比会随调制速率的增大而有所降低。

图2中所标的注入信号功率 P_i 是经3 dB耦合器由光功率计测得的光功率,进入到光纤光栅外腔

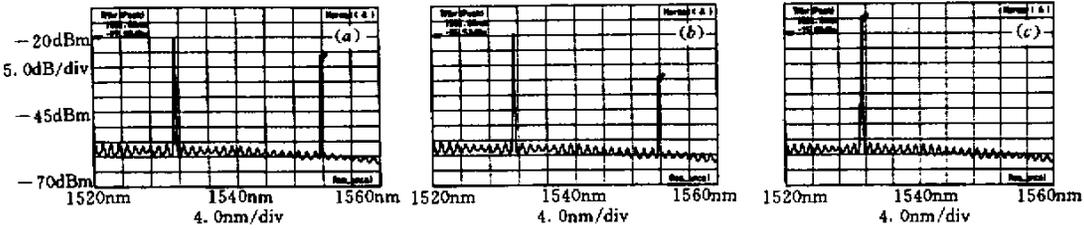


图2 不同注入信号功率时的上波长转换输出端光谱

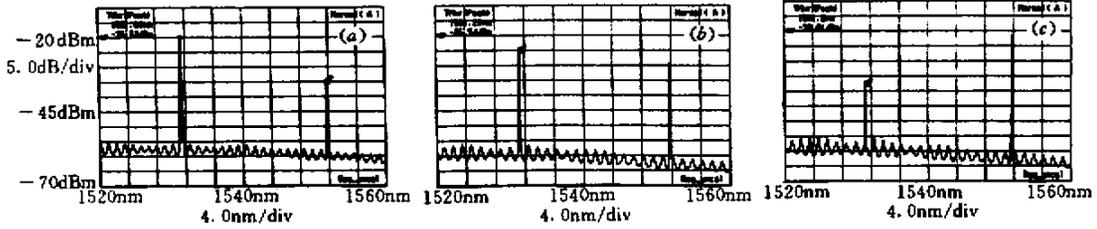
Fig.2 Spectra of converter output for up-conversion with different injection optical power P_i (a) $P_i = 50 \mu\text{W}$; (b) $P_i = 70 \mu\text{W}$; (c) $P_i = 250 \mu\text{W}$ 

图3 不同注入信号功率时的下波长转换输出端光谱

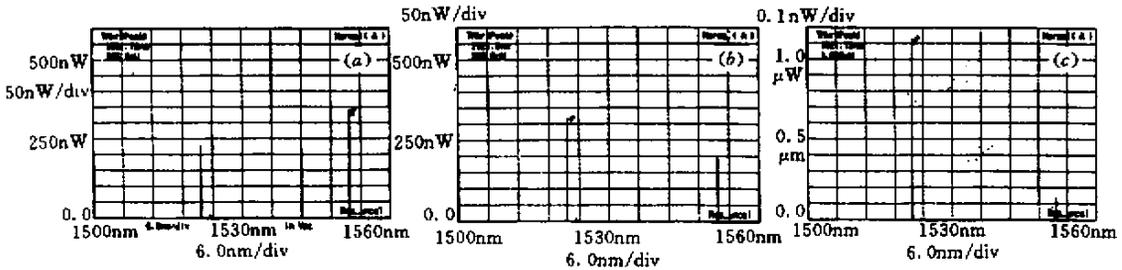
Fig.3 Spectra of converter output for down-conversion with different injection optical power P_i (a) $P_i = 25 \mu\text{W}$; (b) $P_i = 75 \mu\text{W}$; (c) $P_i = 250 \mu\text{W}$ 

图4 不同注入信号功率时的大间隔转换输出端光谱

Fig.4 Spectra of converter output with different injection optical power P_i for a large wavelength range(a) $P_i = 50 \mu\text{W}$; (b) $P_i = 60 \mu\text{W}$; (c) $P_i = 260 \mu\text{W}$

中的光功率与这一数值相当。但由于 F-P 腔半导体管芯与光纤光栅前端光纤之间存在耦合损耗,实际注入到激光介质中的光功率要小于 P_i ,而对增益饱和起作用的正是这部分注入光。所以为了能够以较低的外部注入光功率就可将激光器熄灭,应提高半导体管芯与光纤光栅前端光纤之间的耦合效率。目前的耦合效率小于 30%, 还有进一步提高的可能。

由于信号光源也为一光纤光栅外腔半导体激光器,故将信号源与 FBG-ECL 位置互换,就可进行长波长向短波长(1551.68 nm \rightarrow 1531.44 nm)的下波长转换实验,图 3 为输出端光谱测量结果。由于不是对同一个 FBG-ECL 的波长上、下转换,所以其结果不能进行相互比较。但是,该实验结果定性地说,对于上、下波长转换均具有较高的转换效率。

3.1.2 大转换间隔实验

在 WDM 系统中,随着复用波长数的增加,波长转换的间隔将加大。对于均匀增宽介质,介质中任意频率 ν 的增益系数为^[11]

$$G(\nu) = \frac{(\Delta\nu/2)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu/2)^2(1 + I_\nu/I_s)} G_0(\nu_0) \quad (1)$$

式中, I_s 为饱和参量, ν_0 为激光跃迁中心频率, $\Delta\nu$ 为谱线线宽, $G_0(\nu_0)$ 为小信号增益, I_ν 表示频率为 ν 的光的强度。

(1)式表明,频率偏离激光跃迁中心频率的光虽然也能引起介质的饱和效应,但其作用较小,偏离 ν_0 越远,饱和作用越弱。因此,对于基于增益饱和效应的波长转换器,随着入射信号光波长与 FBG-ECL 中心波长间隔的增大,转换效率将降低,最大的转换范围是受增益介质的增益谱宽限制的。

本实验中,信号光波长 $\lambda_1 = 1521.6 \text{ nm}$, FBG-ECL 波长 $\lambda_2 = 1551.7 \text{ nm}$ 转换间隔为 30 nm 。图 4 给出了输出端光谱测量结果,可见此时的转换效率明显低于间隔为 20 nm 时的转换效率。

3.2 动态转换实验

通常将注入光调制等效为注入电流调制来处理。对半导体激光器的小信号注入电流调制,存在“类共振频率” Ω_R ,表征了器件对动态信号的转换能力。调制速率在 Ω_R 内时,动态输出信号响应平坦,调制速率大于 Ω_R 时,动态输出信号响应迅速降低,并且转换信号波形发生畸变。 Ω_R 的表达式为^[12]

$$\Omega_R = \left[\frac{AN_0}{\tau_R} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau} + AN_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中, A 为常数, N_0 为稳态时光子密度, τ_R 为光腔内光子平均寿命, τ 为有源层内载流子的寿命。

式(2)表明,为提高 Ω_R 值,应减小光子寿命,并使激光器在尽可能高的光子密度下运行。对于光纤光栅外腔激光器,因存在一相对于有源层较长的光纤光栅外腔,因此光子平均寿命要高于普通半导体激光器,转换速率将降低。因此,为使器件具有高的波长转换速率,应在封装工艺允许的条件下,尽可能减小光纤光栅前端光纤长度,采用短外腔结构。另一方面,可以通过增加激光器注入电流的方法,使激光器在尽可能高的光子密度下运行。实验结果表明,对转换信号的消光比来说,存在一个对应于最大消光比的最佳注入电流。因此,靠此方法提高转换速率是有限制的,根本的解决办法是减小光子寿命。

本文进行了 155 Mbit/s 转换实验,波长间隔为 20 nm 。实验时输出端(环形器 3 端口)接入可调谐光滤波器,以观察转换信号。图 5 为 155 Mbit/s 伪随机码调制信号(周期 $2^{15}-1$)的转换信号眼图。可以看出,转换器件具有良好的动态转换特性。因实验条件限制,目前只进行了 155 Mbit/s 转换实验。理论分析表明,本器件可实现上 Gbit/s 的转换速率。

4 结 论



图 5 转换信号眼图

Fig.5 Eye diagram of converted signal

本文对基于光纤光栅外腔半导体激光器增益饱和效应的全光波长转换器的静态与动态特性进行了实验研究。实验结果表明,转换器件具有高于 30 nm 的波长转换范围,并可实现波长上、下转换。对于 155 Mbit/s 伪随机码调制的输入信号,转换信号眼图表明转换器具有很好的动态转换特性。

参 考 文 献

- 1 S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 955 ~ 966
- 2 Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 942 ~ 954
- 3 Byrav Ramamurthy, Biswanath Mukherjee *et al.*. Wavelength conversion in WDM networking. *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, 1998, **16**(7): 1061 ~ 1073
- 4 Hyuek Jae Lee, M. Sohn, K. Kim *et al.*. Wavelength dependent performance of a wavelength converter based on cross-gain modulation and birefringence of a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2): 185 ~ 187
- 5 Sun Junqiang, Zhang Xinliang, Chen Juan *et al.*. Theoretical analysis of wavelength conversion in semiconductor optical amplifiers based on cross-gain saturation. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(6): 524 ~ 528 (in Chinese)
- 6 T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen *et al.*. All-optical wavelength conversion by SOA's in a Mach-Zehnder configuration. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1): 53 ~ 55
- 7 Hideyuki Sotobayashi, Ken-ichi Kitayama. Observation of phase conservation in a pulse sequence at 10 Gb/s in a semiconductor optical amplifier wavelength converter by four-wave mixing. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1): 45 ~ 47
- 8 Kyo Inoue, Manabu Yoshino. Bistability and waveform reshaping in a DFB-LD with side-mode light injection. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(2): 164 ~ 166
- 9 M. F. C. Stephens, R. V. Penty, I. H. White. All-optical regeneration and wavelength conversion in an integrated semiconductor optical amplifier/distributed-feedback laser. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 979 ~ 981
- 10 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): 257261 (in Chinese)
- 11 Zhou Yinghua, Sun Taoheng. *Laser Physics*. Beijing: Beijing University Press, 1991. 166 ~ 181 (in Chinese)
- 12 Luo Ying. Study on fiber Bragg grating based external cavity laser diode. A Dissertation for the Degree of M. S. Eng., Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics, 1999, 25 ~ 28 (in Chinese)