

文章编号: 0258-7025(2001)03-0261-04

# 利用半导体光纤环形激光器实现四波混频 可调谐波长变化\*

迟楠 齐江 郑远 陈树强 管克俭

(北京邮电大学光通信中心 北京 100876)

**提要** 利用 SOA 光纤环构成环形激光器,对波长为 1545.1 nm 的 2.5 Gbit/s 入射信号进行了四波混频波长变换。采用三级滤波加前置放大器形式成功滤出变换信号,向上变换最大距离达 13.8 nm。

**关键词** 半导体光纤环形激光器,四波混频,全光波长变换

中图分类号 TN 929.11;O 437.1 文献标识码 A

## 13.8 nm Up-wavelength Conversion Using Nondegenerate Four-wave Mixing in a Semiconductor-fiber Ring Laser

CHI Nan QI Jiang ZHENG Yuan CHEN Shu-qiang GUAN Ke-jian

(Optical Communication Center, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

**Abstract** The wavelength conversion by nondegenerate four-wave mixing in a tunable semiconductor-fiber ring laser using the lasing beam as a pump beam is demonstrated. Because of the continuous tunable and high power of the ring laser, a wide range up-conversion of 13.8 nm has been obtained at 2.5 Gbit/s.

**Key words** semiconductor-fiber ring laser, four-wave mixing, all-optical wavelength conversion

### 1 引言

波长变换可以解决多节点复杂高速 WDM 网络中波长阻塞和波长竞争问题,提高网络的可扩展性和灵活性,实现动态波长路由和波长重复利用。利用半导体光放大器(SOA)中交叉增益调制(XGM)和交叉相位调制(XPM)进行波长变换结构简单,变换效率高,但是受到载流子寿命的限制,变换速率最高可到 40 Gbit/s<sup>[1]</sup>,而基于 SOA 中四波混频现象进行波长变换具有高达 100 Gbit/s 的信号变换潜力<sup>[2]</sup>,最大变换距离可以达到 80 nm<sup>[3]</sup>。还可以同时将一组输入波长变换到另一组输出波长,并且波长混频(包括四波混频,不同频率产生)保留了原始信号的相位和幅度信息,是唯一具备严格透明性的波长变换方案<sup>[4]</sup>。四波混频的这些优势引起人们的关注<sup>[5~8]</sup>,

但是要提高四波混频波长变换器的竞争力,还需要提高变换效率和变换信号的信噪比。增加 SOA 长度或者增强抽运功率是提高四波混频变换效率的直接举措,但是这些方案对 SOA 和抽运源提出了很高要求。同时由于 SOA 中增益特性和四波混频机制影响,向长波长方向变换信噪比随失谐增加很快劣化<sup>[3]</sup>。文献[5]中利用半导体光纤环形激光器实现了 1 Gbit/s 信号在 1.3  $\mu\text{m}$  频段的变换,向上变换最大距离仅为 6.9 nm。本文报道了利用 SOA-光纤环实现 1.5  $\mu\text{m}$  频段信号的可调谐波长变换。SOA 同时实现半导体光纤环形激光器和四波混频变换的功能,不需要外加大功率抽运源。信号速率为 2.5 Gbit/s,入纤功率为 -0.5 dBm 的信号向上变换了 13.8 nm,并观测了变换信号在 1549 nm 和 1558.9 nm 时的眼图,误码率达到  $10^{-9}$ 。

### 2 实验原理

对于 SOA 中四波混频(FWM)的经典解释是:两

\* 国家自然科学基金(编号:69772034)原邮电部重点科研基金以及霍英东青年教师基金资助项目。

收稿日期:1999-11-05;收到修改稿日期:2000-03-03

束不同波长的光在非线性有源介质中相互作用,介质中的载流子根据入射光强分布形成载流子光栅,入射光被光栅散射,形成新的波长。在 SOA 中至少有三种机制对形成载流子光栅有贡献,分别为载流子浓度脉动、动态载流子热效应和频谱烧洞效应。这些机制具有不同的载流子生存周期和散射长度,SOA 中的 FWM 是这三方面共同作用的结果。入射的信号光(频率为  $\nu_1$ )和抽运光(频率为  $\nu_p$ )被光栅散射,形成新的波长。信号光被光栅散射产生频率为  $2\nu_p - \nu_1$  的变换波,抽运光被布居光栅散射形成频率为  $2\nu_1 - \nu_p$  的卫星波。采用适当的滤波器滤出含有信号的变换波,就实现了波长变换。变换效率是基于 FWM 波长变换器的一个重要指标,其理论计算方法已有文献报道,引用较广的表示式为<sup>[9]</sup>

$$\eta = P^2 G^3 R(\Delta\omega) \quad (1)$$

其中  $P$  为抽运光功率,  $G$  为 SOA 增益,  $R$  为相对变换效率函数,表示为

$$R(\Delta f) = 20 \log \left| \sum_{m=1}^3 c_m \frac{1}{1 - i2\pi f\tau_m} \right| \quad (2)$$

$c_m$  是复常量,  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  分别为载流子浓度调制、载流子加热效应和频谱烧孔效应的载流子寿命。

### 3 实验结果

四波混频波长变换器的实验装置如图 1 所示,实验中使用的 SOA 为 Alcatel 公司 1901 型,小信号增益为 20 dB,最大驱动电流为 250 mA,正交极化的

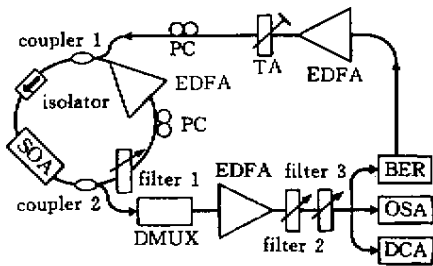


图 1 实验装置

PC: 偏振控制器; TA: 可调衰减器;  
OSA: 光谱仪; DCA: 数字通信分析仪

Fig.1 Experiment setup

PC: polarization controller; TA: tunable attenuator; OSA: optical spectrum analyzer; DCA: digital communication analyzer

偏振灵敏度差为 1.5 dB。当注入电流为 50 mA 时其增益谱如图 2 所示。环形腔中使用了一个与极化无关的隔离器,该隔离器为 E-TEK 公司产品。使用隔

离器可以使环形腔单向工作,稳定激光功率,防止环中反射。环形激光器的输出波长范围为 1530 ~ 1570 nm,与环中滤波器 1 有关。该滤波器是 Santec 公司的 OTF-300 型可调谐滤波器,带宽为 0.8 nm,可调谐范围为 1530 ~ 1570 nm。环形激光器的阈值偏置电流在 1560 nm 时为 120 mA。在环形激光器中,三种与频率相关的机制参与模式选择,分别为 SOA 的增益,SOA 较弱的 Fabry-Perot 模式和滤波器<sup>[6]</sup>,如图 3 所示。由于 SOA 两端面存在微弱反射,因此可将 SOA 看成一个比较弱的 FP 腔,FP 模式的自由谱域为 1.4 nm(175 GHz),调节滤波器选择 SOA 的 FP 模,可以使 SOA 工作在单 FP 模式。为使环中增益最大,我们使用了 EDFA 和偏置控制器。EDFA1 的饱和输出功率为 14 dB,小信号增益为 30 dB,放大器噪声为 6.4 dB。

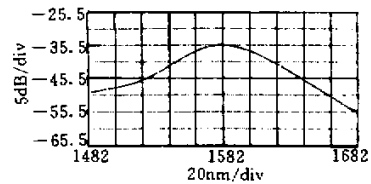


图 2 SOA 中 ASE 噪声频谱

Fig.2 Spectrum of ASE in SOA

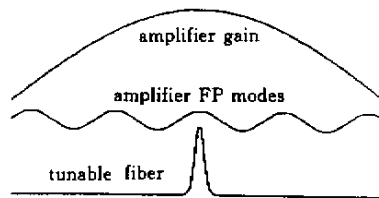


图 3 环形激光器模式选择机制示意图

Fig.3 Schematic representation of the mode selective mechanisms in the ring laser

输入的 2.5 Gbit/s 非归零码数据信号由惠普 Omni BER 718 型 SDH 误码仪产生,信号类型为 STM-16,中心波长为 1545.1 nm,数据格式为  $2^{23} - 1$  伪随机码,输入信号的频谱和眼图如图 4 所示。抽运光由 SOA-光纤环形激光器产生,信号光经耦合器 1 耦合入环形腔,与抽运光共同入射到 SOA 中,发生四波混频作用,经耦合器 2 输出。输入信号光功率经 EDFA 放大后接可调谐衰减器,在 -7 ~ 9 dBm 范围内连续可调,抽运光功率可通过调节 SOA 偏置电流改变。EDFA2 的饱和输出功率为 10 dB,小信号增益 29 dB,放大器噪声 4.2 dB。

WDM 解复用器为 JDS 公司 200 GHz 8 信道

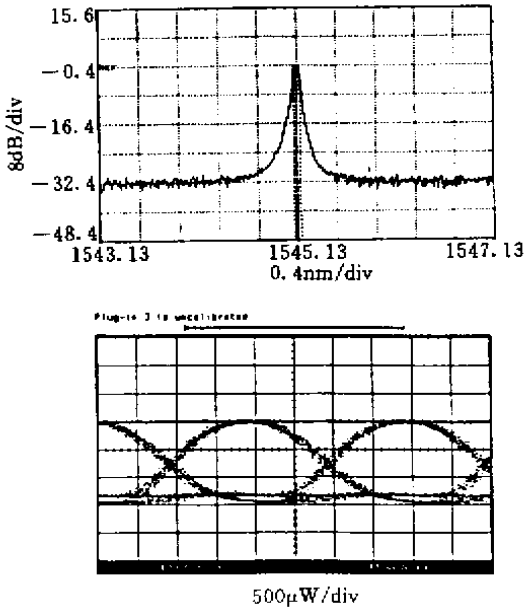


图 4 惠普 omni 718 误码仪产生的信号光频谱和眼图  
Fig.4 Spectrum and eye diagram of the input signal generated by HP omni BER 718

DWDM 解复用器 , 型号为 WD1508R2D2-JS2 , 波长范围为 1549.32 ~ 1560.61 nm , 信道间隔 1.6 nm , 相邻信道隔离度大于 30 dB。滤波器 2 为武汉邮电科学院出品的可调谐滤波器 , 调谐范围为 1540 ~ 1570 nm , 3 dB 带宽为 2 nm。滤波器 3 是 Fabry-Perot 滤波器 , 自由谱域为 3.3 nm , 3 dB 带宽为 0.08 nm , 变换信号经 WDM 解复用器滤波后由 EDFA2 放大 , 再经两级滤波后接到光谱仪查看光谱 , 采用 HP 83480A 数字通信分析仪 ( 光信道带宽 20 GHz ) 观测眼图 , 或者接误码仪测量误码。实验中使用的光谱仪是日本 ANDO 公司光谱仪 AQ-6315B 型 , 最小分辨率 0.05 nm。

通过测量发现 , 当入射电流为 185mA 时 SOA 达到饱和输出功率 , 这是增益饱和与 SOA 热效应共同影响的结果。低信号功率或者小偏置电流四波混频较弱 , 变换效率低 , 但过大的信号功率或过大的偏置电流也会使变换效率降低。这是由于激光振荡被大的入射信号湮灭 , 使抽运功率下降的缘故。输入信号向上变换 13.8 nm , 向下变换 15 nm 时均有较强的四波混频作用 , 见图 5 所示。但是受到 DWDM 解复用器的限制 , 只能滤出波长在 1549 nm 以上的变换信号。变换信号波长为 1549 nm 的频谱和眼图如图 6 所示 , 没有误码。变换信号波长为 1558.9 nm 时的频谱和眼图见图 7 , 误码率为  $2.1 \times 10^{-9}$  激光域 , 获得高效的 FWM 效应。

变换间距为 4 nm 的眼图明显优于变换间距为 13.8 nm 的眼图 , 可以看出 , 减小信号光和抽运光的失谐 , 变换信号功率变大 , 反之 , 使抽运光远离信号光 , 四波混频效应减弱。

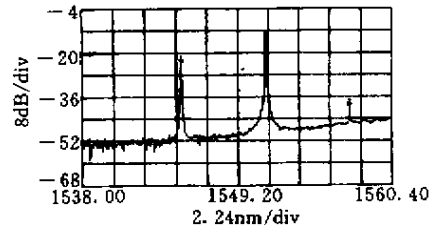


图 5 向长波长变换的四波混频频谱图  
Fig.5 Spectrum of FWM for up-conversion

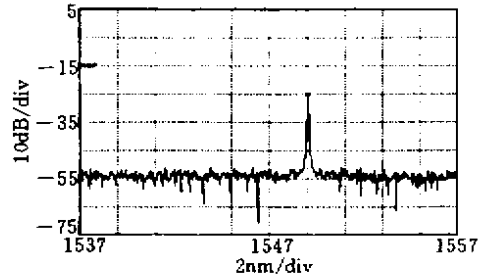


图 6 无误码变换信号的频谱图和眼图 , 此时输入信号功率为 -0.5 dB , 变换间距为 4 nm  
Fig.6 Optical spectrum and eye diagram of the error-free converted wavelength for 4 nm wavelength shift with -0.5 dB input signal power

根据原理部分的公式计算所得的 FWM 变换效率如图 8 中实线所示 , 圆点为实验测量结果。FWM 的变换效率随失谐增加而逐渐减小 , 当失谐大于 2 THz 时 , 四波混频效应很弱 , 失谐在 0.2 ~ 2 THz 范围内理论值与实验吻合较好。利用环形激光器的 FWM 效率比单段 SOA 进行 FWM 变换效率<sup>[10]</sup>要高。其原因在于使用外抽运的 FWM 波长变换 , SOA 增益被总入射光功率饱和 , 而使用环形结构输入信号功率和 SOA 的偏置电流可以控制 , 从而得到最佳内部

## 参 考 文 献

- 1 S. L. Danielsen, C. Joergensen, M. Vaa *et al.*. Bit error rate assessment of a 40 Gbit/s all-optical polarization independent wavelength converter. in OFC '96, 1996, paper PD12
- 2 A. E. Kelly, A. D. Ellis, D. Nasset *et al.*. 100 Gbit/s wavelength conversion using FWM in an MQW semiconductor optical amplifier. *Electron. Lett.*, 1998, **34**( 20 ):1955 ~ 1956
- 3 T. J. Morgan, R. S. Tucker, J. P. R. Lacey. All-optical wavelength translation over 80 nm at 2.5 Gb/s using four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**( 8 ) 982 ~ 984
- 4 S. J. B. Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**( 6 ): 955 ~ 966
- 5 Z. G. Lu, S. A. Boothroyd, J. Chrostowski. Tunable wavelength conversion in a semiconductor-fiber ring laser. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**( 7 ) 806 ~ 808
- 6 M. J. Chawki, I. Valiente, R. Auffret *et al.*. All fiber, 1.5  $\mu\text{m}$  widely tunable single frequency and narrow linewidth semiconductor ring laser with fiber Fabry perot filter. *Electron. Lett.*, 1993, **29**( 23 ) 2034 ~ 2035
- 7 G. Hunziker, R. Paiella, M. Ziari *et al.*. Folded-path self-pumped wavelength converter based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**( 10 ):1352 ~ 1354
- 8 J. M. Yates, J. P. R. Lacey, M. P. Rumsewicz *et al.*. Performance of networks using wavelength converters based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**( 5 ):782 ~ 791
- 9 J. P. R. Lacey, M. A. Summerfield, S. J. Madden. Tunability of polarization-insensitive wavelength converters based on four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**( 12 ) 2419 ~ 2427
- 10 Chi Nan, Qi Jiang, Zheng Yuan *et al.*. Wavelength converter based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier. *High Technol. Lett.* ( 高技术通讯 ), 2000, **10**( 2 ):33 ~ 35

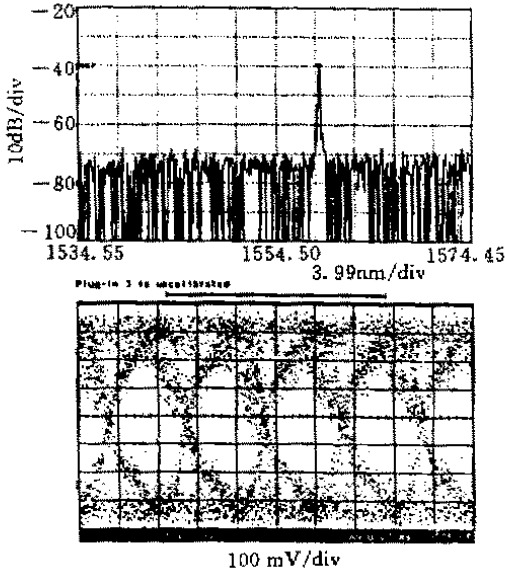


图 7 变换间距为 13.8 nm 时变换信号的  
频谱图和眼图

Fig.7 Optical spectrum and eye diagram of converted wavelength for 13.8 nm wavelength shift

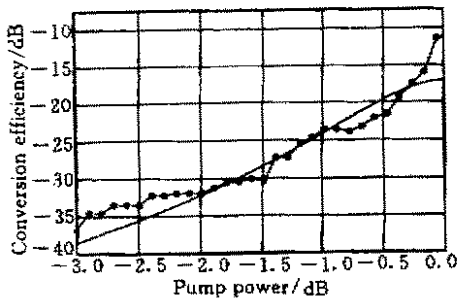


图 8 四波混频变换效率与失谐关系

图中实线为理论计算值 圆点为测量结果

Fig.8 Experimental results (dots) and calculated results of FWM conversion efficiency versus detuning