

文章编号: 0258-7025(2004)12-1495-05

# 基于半导体光放大器-交叉增益调制波长转换器消光比特性的研究

王发强<sup>1</sup>, 赵 宇<sup>1</sup>, 朱竹青<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510631; <sup>2</sup> 南京师范大学物理与科学技术学院, 江苏 南京 210042)

**摘要** 建立了基于半导体光放大器-交叉增益调制(SOA-XGM)的波长转换理论模型,利用分段方法对交叉增益调制波长转换器同向和相向两种工作方式下消光比(ER)特性作了详细的研究。结果表明,波长转换器的输出消光比随转换速率增加而减小,而且转换速率越高,减小得越快;随着抽运波长的变化,消光比有一个对应于峰值增益波长的最佳抽运波长;波长向下转换( $\Delta\lambda < 0$ )时的消光比要明显优于向上转换( $\Delta\lambda > 0$ );输出消光比也随着输入消光比的增大而增大。相同情况下相向工作方式时的输出消光比特性要优于同向工作方式。最后,从物理上对两种工作方式消光比和噪声特性的差异作了解释。

**关键词** 光纤通信技术;波长转换器;消光比;交叉增益调制;半导体光放大器

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Theoretical Study of Extinction Ratio of Wavelength-Converted Optical Signals Based on SOA-XGM

WANG Fa-qiang<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>, ZHU Zhu-qing<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Information and Optoelectronics Science and Engineering,  
South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China

<sup>2</sup> Institute of Science and Technology of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210042, China

**Abstract** A theoretical model of wavelength conversion based on cross gain modulation (XGM) in semiconductor optical amplifier (SOA) is derived. Characteristics of extinction ratio (ER) of converted signal under both co- and counter-propagating scheme are discussed in details. It is shown that the ER of output probe would decrease with the increase of the bit rate of signal, and the larger the bit rate of the signal is, the faster the ER of the output probe decreases. The ER attains optimal value when the pump wavelength is equal to the small signal gain peak wavelength. The ER of down wavelength conversion ( $\Delta\lambda < 0$ ) is larger in evidence than that of up wavelength conversion ( $\Delta\lambda > 0$ ). The ER of output probe would be larger as the increase of ER of input signal. And the ER characteristic of output probe of counter-propagating scheme is better than that of co-propagating scheme under the same condition. Finally, the characteristic difference for two schemes is explained from physical layer.

**Key words** fiber communication technique; wavelength converter; extinction ratio; cross gain modulation; semiconductor optical amplifier

## 1 引 言

波分复用(WDM)技术是光纤通信系统向高速率、大容量方向发展的有效技术途径,也是建立光传

送网(Optical transmission network, OTN)的基础。波长转换器(WC)是波分复用系统关键器件之一。它在光开关、光交换、波长路由和波长再用等技术中有着广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期:2003-06-09;收到修改稿日期:2003-11-10

作者简介:王发强(1968—),男,江苏灌云县人,华南师范大学副教授,博士,主要从事光通信网络、器件以及光量子保密通信等领域的研究。E-mail: fq\_wang@163.com

近年来,已经发展了多种全光波长转换技术(All optical wavelength converter, AOWC),而基于半导体光放大器(SOA)的波长转换技术由于转换速率快,转换带宽大,转换效率高,结构简单,易于集成等优点,成为主要的研究方向。基于半导体光放大器的波长转换技术主要有:采用交叉增益调制(XGM)的全光波长转换<sup>[3]</sup>,采用交叉相位调制(Cross-phase modulation, XPM)的全光波长转换<sup>[4]</sup>,利用半导体光放大器中四波混频效应的全光波长转换<sup>[5]</sup>。

目前对基于半导体光放大器-交叉增益调制的全光波长转换技术的研究报道大部分基于抽运光和探测光同向输入的工作方式,文献[6,7]研究了同向和相向两种工作方式下的交叉增益调制型波长转换器的噪声特性。结果表明,相向工作方式受自发辐射噪声的影响要远大于同向工作方式。本文对交叉增益调制方案抽运光和探测光同向和相向两种工作方式的消光比(ER)特性进行了研究和比较。

## 2 原 理

基于交叉增益调制的波长转换同向和相向两种工作方式的原理如图 1 所示,  $L$  为半导体光放大器的长度。平均功率为  $P_{10}$ , 波长为  $\lambda_1$  的强度调制的抽运光射入半导体光放大器, 调制半导体光放大器内部的载流子浓度, 从而调制半导体光放大器的增益, 因此其携带的信息就可以复制到射入半导体光放大器中的功率为  $P_{20}$ , 波长为所需波长  $\lambda_2$  的连续光上。两束光既可以同向输入(a), 也可以相向输入(b)。后者可以省略掉用来过滤抽运光的滤波器, 但和同向工作方式相比, 放大的自发辐射噪声较大<sup>[7]</sup>, 会减小工作带宽。

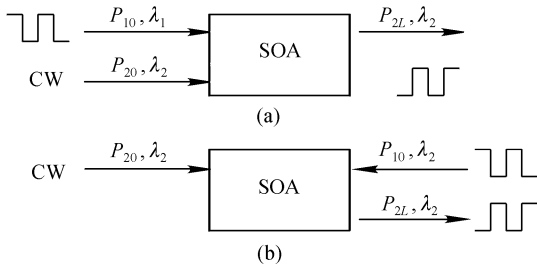


图 1 基于半导体光放大器-交叉增益调制的波长转换原理图

(a) 同向方式; (b) 相向方式

Fig. 1 Scheme of wavelength conversion based on SOA-XGM

(a) co-propagating; (b) counter-propagating

## 3 理论模型

在半导体光放大器中,光脉冲的传输方程为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial E_w(z,t)}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E_w(z,t)}{\partial t} = -\frac{i}{2} a \Gamma g_w E_w(z,t) + \frac{1}{2} (\Gamma g_w - \alpha_{in}) E_w(z,t) \quad (1)$$

式中,  $w = 1, 2$  分别对应抽运光  $\lambda_1$  和探测光  $\lambda_2$ ,  $E_w(z,t)$  代表光脉冲能量,  $v_g$  为群速度,  $a$  为线宽增强因子,  $\Gamma$  为模场限制因子,  $\alpha_{in}$  为内部损耗,  $g_w$  为有源区增益。这里假设半导体光放大器有源区的长度为  $500 \mu\text{m}$ , 群速度  $v_g$  为  $7.5 \times 10^7 \text{ m/s}$ , 那么脉冲通过半导体光放大器有源区的时间为  $6.67 \text{ ps}$ 。而通常波长转换的速率为  $2.5 \sim 40 \text{ Gbit}$ , 对应的脉冲比特周期为  $400 \sim 25 \text{ ps}$ , 因此脉冲通过时间远远小于脉冲比特周期, 即  $v_g^{-1} |\partial E/\partial t| \ll |\partial E/\partial z|$ , 所以(1)中左边第二项计算时可以忽略。

半导体光放大器中载流子速率方程为

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N(z,t)}{\tau_c} - \sum_w \frac{\Gamma g_w [N(z,t)]}{\eta \omega_w A_x} \bar{P}_w \quad (2)$$

式中,  $I$  为半导体光放大器的注入电流,  $q$  为电子电量,  $V$  为半导体光放大器有源区体积,  $\tau_c$  为自发辐射载流子寿命且  $\tau_c^{-1} = A + BN + CN^2$ , 其中  $A, B, C$  分别为非辐射、双分子和俄歇复合系数。  $\eta \omega_w$  为光子能量,  $A_x$  为有源区横截面积。

光脉冲在半导体光放大器内部传输过程中, 纵向载流子浓度、光子浓度和折射率是不断变化的, 因此, 为更精确地模拟波长转换的内部过程, 采用分段模型<sup>[6-8]</sup>。即把半导体光放大器在光传输的方向分成  $m$  段, 每一段中的载流子浓度可认为不随距离而变化。每一段的平均功率由下式计算(下标  $j$  代表段标号)<sup>[9]</sup>

$$\bar{P}_{w,j} = \frac{1}{\Delta L} \int_{(j-1)\Delta L}^{j\Delta L} P_{w,j-1} e^{[\Gamma g_w (N_{av,j}) - \alpha_{in}]z} dz = \frac{G_j - 1}{\ln(G_j)} P_{w,j-1} \quad (3)$$

其中  $G_j = e^{[\Gamma g_w (N_{av,j}) - \alpha_{in}] \Delta L}$ ,  $\Delta L$  为每一段的长度。  $P_{w,j-1}$  为第  $j-1$  段的输出功率, 且有  $P_{w,j-1} = |E_{w,j-1}|^2$ 。

为准确模拟半导体光放大器的增益谱, 采用下面的函数

$$g(N) = a(N - N_0) - \gamma_1 (\lambda - \lambda_N)^2 + \gamma_2 (\lambda - \lambda_N)^3 \quad (4)$$

式中  $a$  为微分增益,  $N_0$  为透明载流子浓度,  $\gamma_1, \gamma_2$  为

增益系数,  $\lambda_N$  为峰值增益波长

$$\lambda_N = \lambda_0 - k_0(N - N_0) \quad (5)$$

$\lambda_0$  为透明时峰值增益波长,  $k_0$  为一常数。

### 4 数值模拟

计算中用到的基本参数值见表 1。把半导体光放大器分为 10 段, 采用 4 阶超高斯脉冲来模拟输入

抽运光, 为保证精度, 每个脉冲周期采样 1000 点。

图 2 是相同抽运光输入时两种工作方式下的输出波形。(a) 为输入抽运光, 为“0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0”的超高斯脉冲序列。(b) 中实线为相向工作方式下的输出转换信号, 虚线为同向工作方式下的输出转换信号(下同)。

表 1 基本参数表

Table 1 Table of general parameters in theoretical calculation

Parameters	Symbol	Value
Chip length / $\mu\text{m}$	$L$	500
Cross area of active layer / $\mu\text{m}^2$	$A_{\text{cross}}$	0.3
Material loss / $\mu\text{m}^{-1}$	$\alpha_{\text{in}}$	$2.0 \times 10^{-3}$
Mode confinement factor	$\Gamma$	0.3
Transparent carrier density / $\mu\text{m}^{-3}$	$N_0$	$0.9 \times 10^6$
Nonradiative recombination constant / $\text{ns}^{-1}$	$A$	0.1
Bimolecular recombination constant / ( $\mu\text{m}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$ )	$B$	$2.5 \times 10^{-8}$
Auger recombination constant / ( $\mu\text{m}^6 \cdot \text{ns}^{-1}$ )	$C$	$9.4 \times 10^{-14}$
Material gain constant / $\mu\text{m}^2$	$\alpha$	$2.5 \times 10^{-8}$
Gain spectrum coefficient 1 / $\mu\text{m}^{-3}$	$\gamma_1$	7.4
Gain spectrum coefficient 2 / $\mu\text{m}^{-4}$	$\gamma_2$	31.55
Shift constant for peak wavelength / $\mu\text{m}^4$	$k_0$	$3.0 \times 10^{-8}$
Differential refractive index / $\mu\text{m}^3$	$dn/dN$	$-1.2 \times 10^{-8}$
Group velocity / ( $\mu\text{m} \cdot \text{ns}^{-1}$ )	$v_g$	$7.5 \times 10^4$

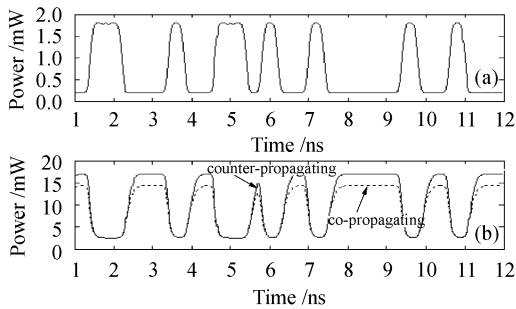


图 2 两种工作方式下的转换信号

Fig. 2 Converted signal under two operation schemes

图 3 为输出消光比随信号速率的变化曲线。从图中可以看出, 其他条件相同, 转换速率由小变大, 相向情况下的输出消光比要大于同向情况。两种情况下, 输出消光比随转换速率增加而减小, 而且转换速率越高, 减小越快。输入消光比为 9.5 dB, 注入电流为 120 mA 的情况下, 转换速率达到 20 Gbit/s 时, 相向和同向方式下的输出消光比分别为 6.3 dB 和 5.7 dB, 恶化已经相当严重。这是由于半导体光

放大器中的载流子浓度的恢复时间受半导体材料限制, 如果调制速率过高, 载流子来不及恢复, 会造成放大器增益下降, 从而使输出消光比下降。从图中还可以看出, 增大注入电流可以增大输出消光比。

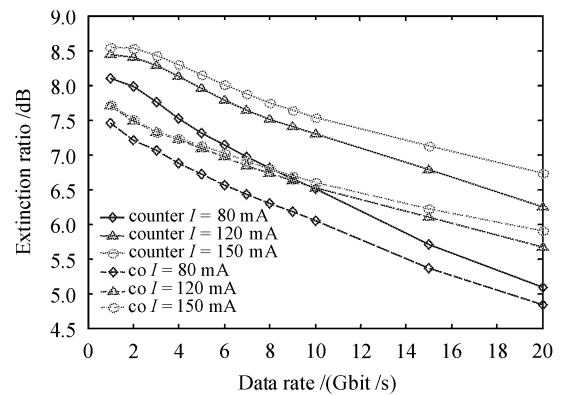


图 3 输出消光比随信号速率的变化曲线

Fig. 3 Curves of output extinction ratio under different data rate

$\lambda_1 = 1570 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 1560 \text{ nm}$ ,  $P_2 = -10 \text{ dBm}$ ,  $ER_m = 10 \text{ dB}$  (high; 3 dBm; low; -7.0 dBm)

这是因为大的注入电流可以增加载流子浓度,提高放大器增益,从而增大输出消光比。

图 4 是输出消光比随抽运光波长的变化曲线。可以看出,抽运光波长由  $1.5 \mu\text{m}$  增加到  $1.6 \mu\text{m}$  过程中,相向方式输出消光比总大于同向方式。而且对于输出消光比,有一个最佳抽运波长,一般来说,这个最佳抽运波长对应于峰值增益波长<sup>[10]</sup>,将抽运光置于此波长,可得到最大输出消光比。从图中还可以看出,随着探测光功率的减小,这个最佳抽运波长向长波方向漂移。

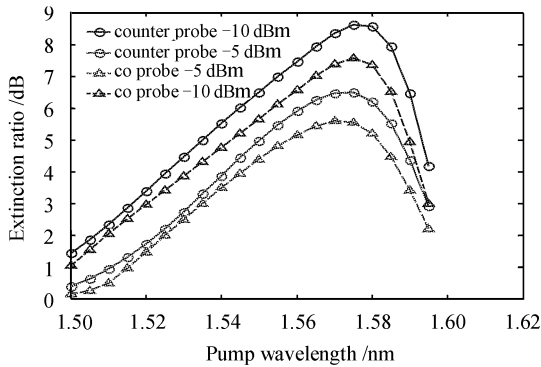


图 4 输出消光比随抽运光波长的变化曲线  
Fig. 4 Curves of output extinction ratio under different  $\lambda_1$

data rate=2.5 Gbit/s,  $I = 120 \text{ mA}$ ,  $\lambda_2 = 1560 \text{ nm}$ ,  
 $ER_{in} = 10 \text{ dB}$  (high: 3 dBm; low: -7.0 dBm)

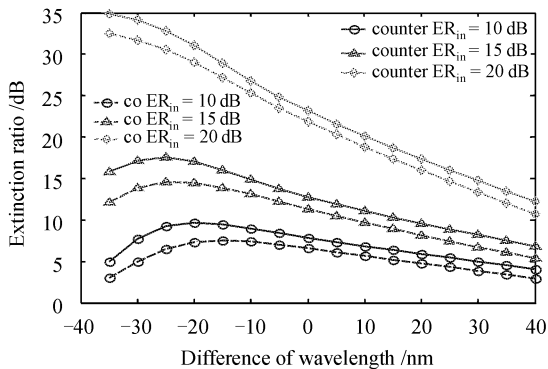


图 5 输出消光比随两光波波长差的变化曲线  
Fig. 5 Curves of output extinction ratio under different difference of wavelength

data rate=2.5 Gbit/s,  $I = 120 \text{ mA}$ ,  $P_2 = -10 \text{ dBm}$

图 5 所示为输出消光比随波长差  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  的变化曲线。和上面讨论类似,相向情况下的输出消光比优于同向情况。从图中可以看出,输出消光比和输入消光比以及抽运光波长的选择有关。波长向下转换( $\Delta\lambda < 0$ )时的消光比要明显优于向上转换( $\Delta\lambda > 0$ )。对于一个指定的所需波长  $\lambda_2$ ,可以选择一个

适当的抽运光波长来获得最大消光比。另外,输出消光比也随着输入消光比的增大而增大。

### 5 两种工作方式性能差异的分析

为更好地说明探测光在不同位置处的增益情况,图 6(a),(b)分别给出了相同情况下探测光在半导体光放大器不同位置处的波形。比较图 6(a),(b),有一点值得注意:虽然相向工作方式下输出端探测光脉冲幅度要大于同向工作方式,但在  $400 \mu\text{m}$  以前的位置处,同向工作方式下的探测光幅度要大于相向工作方式。这一现象要结合载流子浓度的空间分布来解释。

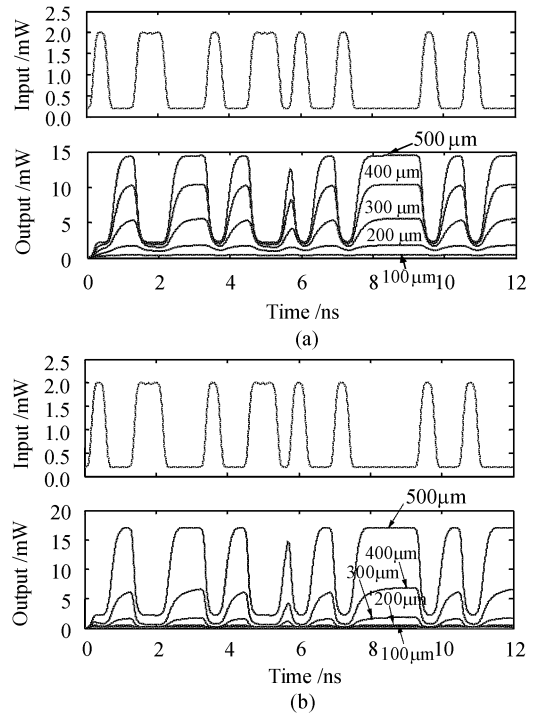


图 6 探测光在半导体光放大器不同位置处的波形  
(a) 同向方式;(b) 相向方式

Fig. 6 Various wave patterns of probe at different positions

(a) co-propagating; (b) counter-propagating

图 7 给出了同向和相向两种工作方式下某时刻载流子浓度的空间分布。由图可以看出,在放大器的前端,同向下的载流子浓度大于相向情况,而在放大器的末端,情况正好相反。由放大器的功率传输方程可知,光功率和载流子浓度呈指数关系,同向工作方式下,半导体光放大器前端载流子浓度大,放大倍数也大,因此此时的光功率也较相向方式下的光功率大;随着传输距离的增加,同向方式下的载流子

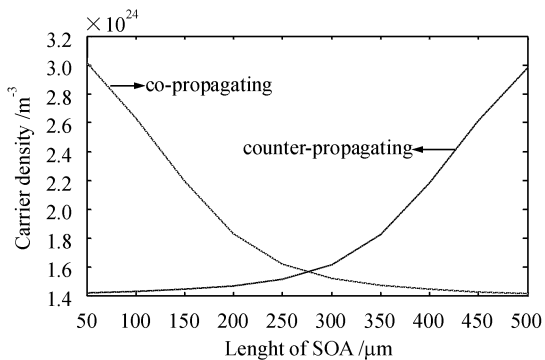


图 7 某时刻两种工作方式的载流子的空间分布

Fig. 7 Carrier spatial distributions under two schemes

浓度开始小于相向方式,放大倍数也小于相向方式,探测光功率开始得不到有效的放大,但由于此前的光功率基数较大,因此此时同向方式下的探测光功率还是大于相向方式;但在传输了相当距离后,在半导体光放大器输出端,相向方式下的载流子浓度远远大于同向方式,放大倍数也呈指数上升,探测光得到了更有效的放大,因此输出的探测光幅度相向方式要大于同向方式。这一过程从图 6(a), (b) 可以很清楚地看出。

同样,相向工作方式的自发辐射噪声大于同向的原因<sup>[6]</sup>也是由于载流子浓度的空间分布不均匀引起的。半导体光放大器的增益按载流子浓度呈指数增长,而自发辐射噪声几乎和载流子浓度是线性关系,虽然在半导体光放大器的前段,相向情况下的载流子浓度较低,自发辐射噪声较小,但其在后半段经历了一个更大的增益,得到了一个更有效的放大,所以在输出端得到比同向情况更大的自发辐射噪声。

## 6 结 论

交叉增益调制型波长转换器的输出消光比随转换速率增加而减小,而且转换速率越高,减小得越快;随着抽运波长的变化,消光比有一个动态变化的范围,一般来说,有一个最佳抽运波长,它对应于峰值增益波长,将抽运光置于此波长,可得到最大输出消光比;输出消光比也和输入消光比以及抽运光波长的选择有关。波长向下转换时的消光比要明显优于向上转换;输出消光比也随着输入消光比的增大而增大。要获得大的消光比,可采取减小转换速率,增大注入电流,增大输入信号消光比等方法来实现。

综合本文研究结果和文献<sup>[6,7]</sup>的研究和实验结果,可对两种工作方式的优缺点作一个归纳:同向工作方式下波长转换器的放大的自发辐射噪声较小,如果对其他参数进行适当优化,可能得到较大的信噪比和带宽,但输出端需要滤波器;相向工作方式下波长转换器具有较大的输出消光比,不需要滤波器,可转换至同一波长,但其放大的自发辐射噪声较大。因此,在实际应用中,可以根据情况和对系统性能某一方面的需要,来选择合适的波长转换方式。

## 参 考 文 献

- 1 S. Okamoto, K. Sato. Optical path cross-connect systems for photonic transport networks [C]. *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.*, 1993, 1:474~480
- 2 M. J. Offside, J. E. Carroll, M. E. Bray *et al.*. Optical wavelength converters [J]. *Electron. & Commun. Engineering Journal*, 1995, 7(2):59~71
- 3 Kristof Obermann, Stephan Kindt, Dirk Breuer *et al.*. Performance analysis of wavelength converters based on cross-gain modulation in semiconductor-optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, 16(1):78~85
- 4 T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen *et al.*. All optical wavelength conversion by SOA's in a Mach-Zehnder configuration [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, 6(1):53~55
- 5 Jianhui Zhou, Namkyoo Park, Jay W. Dawson *et al.*. Efficiency of broadband four-wave mixing wavelength conversion using semiconductor travelling-wave amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, 6(1):50~52
- 6 Zhang Xinliang, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. Noise characteristics in XGM wavelength conversion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(10):1256~1259  
张新亮,黄德修,孙军强等.交叉增益调制型波长转换器噪声特性的研究[J]. *光学学报*, 2001, 21(10):1256~1259
- 7 K. Obermann, S. Kindt, K. Petermann *et al.*. Noise characteristics of semiconductor-optical amplifiers used for wavelength conversion via cross-gain and cross-phase modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(3):312~314
- 8 Yabin Ye, Xiaoping Zheng, Hanyi Zhang *et al.*. Study on the dynamic range of input power for wavelength converter based on cross-phase modulation in SOAs [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 200:349~354
- 9 Ye Yabin, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi *et al.*. Chirp performance of converted signal in wavelength conversion based on cross-gain modulation in SOA [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4):436~440  
叶亚斌,郑小平,张汉一等.基于半导体光放大器中交叉增益调制效应的波长转换啁啾特性的分析[J]. *光学学报*, 2002, 22(4):436~440
- 10 Ye Yabin, Zheng Xiaoping, Zhang Hanyi *et al.*. Choice of the signal wavelength in wavelength conversion by cross gain modulation in the SOA [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, A29(8):722~728  
叶亚斌,郑小平,张汉一等.增益调制型波长转换中信号光波长的选择[J]. *中国激光*, 2002, A29(8):722~728