

文章编号: 0258-7025(2004)10-1245-07

## 波分复用-光时分复用波长转换信号的 消光比研究

朱竹青<sup>1</sup>, 王发强<sup>2</sup>, 殷奎喜<sup>1</sup>

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

**摘要** 对基于半导体光放大器(SOA)交叉增益调制(XGM)效应的全光波分复用-光时分复用(WDM-OTDM)转换后的两路时分复用输出信号的消光比(ER)特性进行了分析。研究了两路波分复用的输入抽运光和探测光的功率、波长、抽运光的消光比、数据速率以及半导体光放大器的偏置电流、腔长和模场限制因子对转换信号消光比的影响。模拟结果表明,增大抽运光输入功率,选择长波长抽运光,可以增加转换光相应信道消光比,但减小了相邻信道的输出消光比;增加抽运光消光比,可以提高转换光消光比,但各个信道增长幅度不同;减小探测光输入功率,选取短波长探测光波长,增加半导体光放大器的腔长和模场限制因子以及大的偏置电流可提高转换光消光比;对于两路或多路波分复用信号转换时分复用信号的过程中,一定要考虑转换光每个信道消光比的均衡。

**关键词** 光通信; 半导体光放大器; 交叉增益调制; 波长转换; 消光比

中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

### Study on Signal Extinction Ratio in WDM-OTDM Wavelength Conversion

ZHU Zhu-qing<sup>1</sup>, WANG Fa-qiang<sup>2</sup>, YIN Kui-xi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Science and Technology of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210042, China*  
<sup>2</sup>*College of Optoelectronic Information Technology,  
South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China*

**Abstract** The extinction ratio performance of converted two-channel time division multiplexing output signals in all-optical WDM (wavelength division multiplexing)-OTDM (optical time division multiplexing) converter based on cross-gain modulation (XGM) in semiconductor optical amplifier (SOA) is analyzed. The effects on the extinction ratio of converted signal is studied regarding to various parameters such as the power and wavelength of two-channel WDM input pump and probe, the bit rate, the extinction ratio of the pump, the SOA bias current, cavity length, and confinement factor. Which can provide the theoretical basis for the optimization of wavelength converter and signal processing in WDM switching nodes. It is shown by numerical simulation that high pump input power and long pump wavelength enhance signal extinction ratio of corresponding channel but decrease the adjacent channel extinction ratio. High pump extinction ratio can do too, however, the increasing amplitudes of different channels are different. Meanwhile extinction ratio of converted signal can be improved with low probe power, short probe wavelength, long cavity length, high confinement factor, and large biased current. Especially extinction ratio equalization of each channel should be considered in all-optical WDM-OTDM wavelength conversion.

**Key words** optical communication; semiconductor optical amplifier; cross-gain modulation; wavelength conversion; extinction ratio

收稿日期: 2003-06-02; 收到修改稿日期: 2003-11-03

基金项目: 南京师范大学青年科学资金(2002XQ03)资助项目。

作者简介: 朱竹青(1976—), 男, 江苏泰州人, 南京师范大学物理科学与技术学院硕士研究生, 主要从事光纤通信系统建模和波长转换等光器件方面的研究。E-mail: zhuzhuqing@pine.njnu.edu.cn

# 1 引 言

高速数据业务的需求,互联网技术的飞速发展以及多媒体业务的增加,呼唤着新一代网络——全光网络的诞生。全光网络克服了现有网络在传送和交换时的电子瓶颈,减少了信息传输的拥塞,提高了节点的吞吐量。目前光波分复用(WDM)和光时分复用(OTDM)混合系统是解决干线上高速大容量传输和多用户通信网络的最佳方式。这不仅充分利用了光纤带宽资源,增加系统的传输容量,而且构建了技术简单、性能价格比合理的全光网络。因此在混合的波分复用-光时分复用网络中,将需要在给定的网络节点处进行数据的全光转换。这种全光波分复用到光时分复用转换已有相应的实验报道,例如利用半导体光放大器(SOA)或光纤中的四波混频效应(FWM)<sup>[1,2]</sup>,基于半导体光放大器交叉相位调制(XPM)马赫-曾德尔干涉仪(MZI-SOA's)数据速率可达 40 Gbit/s<sup>[3]</sup>,利用非线性光学环境(NOLM)可复用到 100 Gbit/s<sup>[4]</sup>。最近报道的利用电吸收调制器(EAM)的交叉吸收调制效应(XAM)可复用到 60 Gbit/s<sup>[5]</sup>。另外,利用半导体光放大器的交叉增益调制(XGM)数据速率可达 40 Gbit/s<sup>[6]</sup>,天津大学也有数据速率达 1.2 Gbit/s 的相关实验报道<sup>[7]</sup>。

这种方法结构简单,变换频域宽,对极化不敏感,信噪比高,应用前景广阔。本文通过半导体光放大器交叉增益调制波长变换的理论模型,重点讨论了抽运光和探测光的功率、波长、抽运光的消光比、数据速率以及半导体光放大器的偏置电流、腔长和模场限制因子对波分复用-时分复用转换后输出信号消光比(ER)的影响。

# 2 理论模型

图 1 是基于半导体光放大器交叉增益调制的波分复用-时分复用波长转换的原理图<sup>[8]</sup>。两路同步且相互交替归零(RZ)的波分复用抽运信号(波长分别为  $\lambda_{pump1}, \lambda_{pump2}$ ) 和具有一定强度的连续探测光(波长为  $\lambda_{probe}$ ) 同时耦合进波长转换器。当抽运光注入到半导体光放大器后,两路信号光交替调制半导体光放大器的增益。当为 1 码时,将消耗大量载流子,使半导体光放大器工作在增益饱和区域。当为 0 码时,放大器的增益迅速恢复到原来的值,从而呈反相调制的增益对连续的探测光进行调制,使得两路波分复用信号交替转换给探测光,并以两信道的非归零码(NRZ)形式的时分复用信号输出,实现了低速波分复用信号到高速时分复用信号的转换。

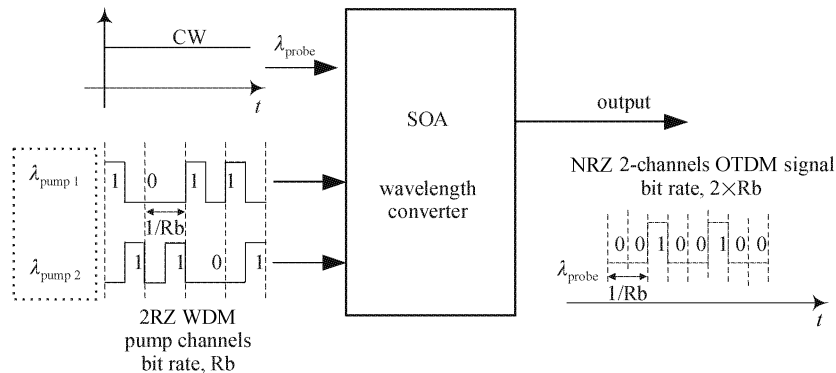


图 1 基于半导体光放大器交叉增益饱和效应的波分复用-光时分复用转换器  
Fig. 1 WDM-OTDM converter based on cross-gain compression in SOA

半导体光放大器中,假设端面反射系数  $R = 0$ , 则同向传输的抽运光和探测光满足传输方程<sup>[9]</sup>

$$\frac{1}{v_{gr}} \frac{\partial P_i(z,t)}{\partial t} + \frac{\partial P_i(z,t)}{\partial z} = \{ \Gamma g_i [N(z,t)] - \alpha_{in} \} P_i(z,t) \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3$  分别对应抽运光  $\lambda_{pump1}, \lambda_{pump2}$  和探测光  $\lambda_{probe}$ 。其中  $P_i(z,t)$  代表光功率,  $v_{gr}$  为群速度,  $\Gamma$  为模场限制因子,  $\alpha_{in}$  为内部损耗,  $g_i(N)$  为相应波长  $\lambda_i$  时的增益系数。考虑到脉冲通过时间远远小于脉冲比

特周期,即  $v_{gr}^{-1} |\partial E / \partial t| \ll |\partial E / \partial z|$ , 所以(1)式中左边第一项计算时可以忽略。

忽略放大的自发辐射(ASE)对载流子浓度的消耗,半导体光放大器中载流子速率方程为<sup>[9]</sup>

$$\frac{\partial N(z,t)}{\partial t} = \frac{I}{qV} - \frac{N(z,t)}{\tau_c} - \sum_i \frac{\Gamma g_i [N(z,t)]}{\hbar \omega_i A_{cross}} \bar{P}_i \quad (2)$$

$I$  为半导体光放大器注入电流,  $q$  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,  $\tau_c^{-1} = A + BN + CN^2$ , 其中  $A, B, C$  分别为非辐射复合、双分子复合和俄歇复合系数。 $\hbar\omega_i$  为两抽运光和探测光的光子能量,  $A_{\text{cross}}$  为有源区横截面积,  $\bar{P}_i$  为平均功率。

光脉冲在半导体光放大器内部传输过程中, 受激辐射将会影响纵向载流子密度。为了更准确地研究半导体光放大器动态特性, 本文采用通用的分段处理方法, 即把半导体光放大器在光传输的方向分成  $m$  段, 每一段中的载流子密度可认为不随位置变化。则每一段的平均功率由下式计算(下标  $j$  代表段标号)<sup>[10]</sup>

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

其中  $G_j = e^{[\Gamma g_i(N_{\text{av},j}) - \alpha_{\text{in}}]\Delta L}$ ,  $\Delta L$  为每一段的长度。 $P_{i,j-1}$  为第  $j-1$  段半导体光放大器的输出光功率。

半导体光放大器的增益谱一般为非对称的抛物线, 根据实验的经验值, 采用三次方表示的函数<sup>[11]</sup>

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

$a$  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,  $\lambda_N = \lambda_0 - k_0(N - N_0)$ ,  $\lambda_0$  为透明时峰值增益波长,  $k_0$  为一增益常数, 用来表示增益峰值波长随载流子密度的漂移。

### 3 数值模拟

计算过程中所用到的参数如表 1 所示<sup>[12]</sup>。

表 1 半导体光放大器参数

Table 1 Parameters of semiconductor optical amplifier

Description	Symbol	Value	Unit
SOA length	$L$	1200	$\mu\text{m}$
Carrier density at transparency	$N_0$	$1.1 \times 10^6$	$\mu\text{m}^{-3}$
Material loss	$\alpha_{\text{in}}$	$2 \times 10^{-3}$	$\mu\text{m}^{-1}$
Cross-section area of the active layer	$A_{\text{cross}}$	0.15	$\mu\text{m}^2$
Confinement factor	$\Gamma$	0.4	
Differential gain	$\alpha$	$2.5 \times 10^{-8}$	$\mu\text{m}^2$
Material gain constant	$\gamma_1$	7.4	$\mu\text{m}^{-3}$
	$\gamma_2$	31.55	$\mu\text{m}^{-4}$
	$k_0$	$3.0 \times 10^{-8}$	$\mu\text{m}^4$
Wavelength at transparency	$\lambda_0$	1.605	$\mu\text{m}$
Carrier lifetime	$\tau_c$	240	ps
Nonradiative recombination constant	$A$	0.1	ns
Bimolecular recombination constant	$B$	$2.5 \times 10^{-8}$	$\mu\text{m}^3 \text{ns}^{-1}$
Auger recombination constant	$C$	$9.4 \times 10^{-14}$	$\mu\text{m}^6 \text{ns}^{-1}$

将半导体光放大器分为 10 段, 利用 4 阶龙格-库塔法对载流子速率方程(2)进行数值求解。采用 4 阶超高斯脉冲来模拟输入抽运光。抽运光 1 为 [11001011001111000110111010100] 随机归零码, 平均功率为  $-5$  dBm, 消光比为 10 dB, 波长为 1552 nm, 信号速率为 10 Gbit/s。抽运光 2 为 [00101011101100011110011010010] 随机归零码, 平均功率为  $-5$  dBm, 消光比为 10 dB, 波长为 1548 nm, 信号速率为 10 Gbit/s。探测光功率为  $-10$  dBm, 波长为 1537 nm, 半导体光放大器偏置电流为 180 mA。图 2 给出了两路输入抽运光、等效单路输入抽运光和转换光输出波形(从上到下, 依次记作为 (a)~(d))。

从图 2 可以看出, 转换光(图 2(d))与等效输入光(图 2(c))呈反相变化, 这是交叉增益调制的结果。转换光速率为 20 Gbit/s, 消光比 9.5 dB 左右, 转换性能好。等效抽运光为多个 0 码时, 转换光 1 码开始处出现过冲现象, 比单个 1 码时幅值高一些。等效抽运光为多个 1 码时, 转换光 0 码出现较小幅度的纹波, 没有单个 0 码平滑。这是由于半导体光放大器中载流子的消耗和恢复动态变化的结果。研究输出光消光比的特性, 可以衡量和评价一个系统的性能优劣。高输出消光比有利于信号的解复用和最佳判决, 减小系统的误码率, 同时也有利于波长转换器的级联和全光网络中的功率均衡的管理。下面具体分析抽运光和探测光的波长、功率和半导体光

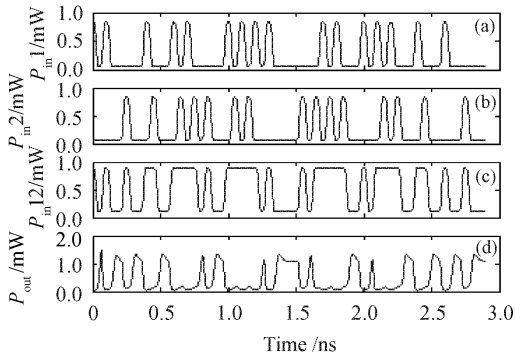


图 2 抽运脉冲波形((a),(b)),等效抽运脉冲波形(c)和转换脉冲波形(d)

Fig. 2 Pump pulse pattern ((a),(b)), the equivalent pump pulse pattern (c) and converted pulse pattern (d)

放大器的物理参数对转换光两路时分信号消光比的影响(以下分别称为转换光 1 和转换光 2)。在以下图中,实线表示转换光 1,虚线表示转换光 2,相同的画图标记代表同种条件。

### 3.1 转换光消光比和抽运光功率的关系

图 3 为不同探测光功率下转换光消光比与抽运光 2 输入光功率的关系,维持系统参数不变。从图 3 中可以看出,转换光两路时分信号消光比呈反相变化。在一定的探测光功率下,转换光 1 消光比随着抽运光 2 输入光功率的增加而减小,而转换光 2 消光比则变大。这是因为抽运光 2 输入光功率的增加,加大了转换光 2 消耗载流子的能力,减少了转换光 1 用于饱和半导体光放大器增益所需要的载流子。增大探测光功率,转换光消光比均减小。从图 3 中还可以看出,系统中存在转换光两路时分信号消光比相等点,位置几乎不受探测光功率变化影响。取  $P_{\text{probe}} = -15 \text{ dBm}$  的情况,相应抽运光输入功率优化值分别为  $P_{\text{pump1}} = -5 \text{ dBm}$ ,  $P_{\text{pump2}} = -0.8 \text{ dBm}$ ,输出消光比约为  $11.8 \text{ dB}$ ,满足高速率节点信号处理的要求,与文献[8]中实验图分析结果一致。

### 3.2 转换光消光比和抽运光调制速率的关系

图 4 为不同探测光功率下转换光消光比与抽运光输入速率的关系。一定探测光功率下,转换光两路时分信号消光比随着信号速率的增大均变小,而消光比差(表示转换光 1 消光比与转换光 2 消光比间的差,以下相同)却在增大。这主要取决于半导体光放大器的载流子寿命。增大探测光功率,两路时分信号消光比曲线整体下移,转换光消光比变小。这是由于增益饱和效应,降低了抽运光转换效率和信号增益。从图 5 可以发现,低速率时,两路时分信

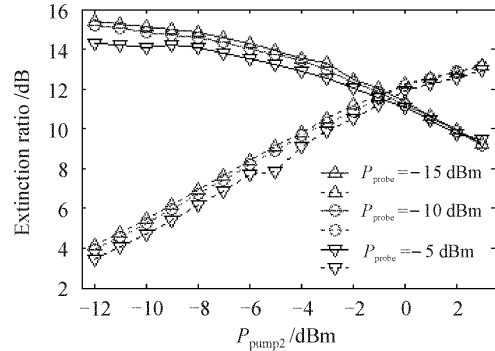


图 3 不同探测光功率下转换光消光比与抽运光 2 输入光功率的关系

Fig. 3 Extinction ratio of covered signal versus the pump 2 power with the different probe power

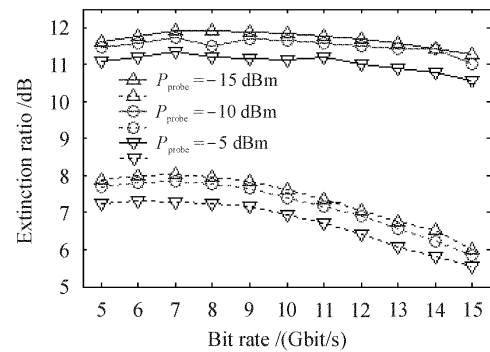


图 4 不同探测光功率下转换光消光比与抽运光速率的关系

Fig. 4 Extinction ratio of covered signal versus the pump bit rate with the different probe power

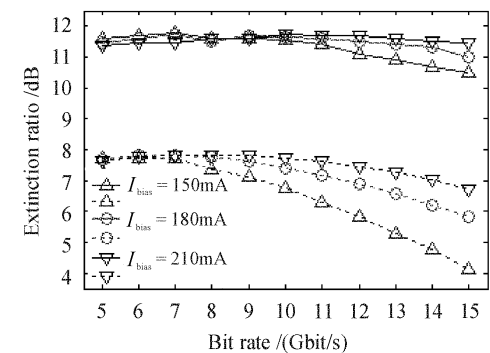


图 5 不同偏置电流下转换光消光比与抽运光速率的关系

Fig. 5 Extinction ratio of covered signal versus the pump bit rate with the different bias current

号消光比受偏置电流变化不大,而在高速率时,增大偏置电流可以提高转换光消光比。

### 3.3 转换光消光比和抽运光波长的关系

图 6 为抽运光 1 光功率不同时转换光消光比与

抽运光 2 波长的关系。抽运光 1 光功率一定条件下,转换光两路时分信号消光比呈反相变化,且消光比曲线存在交点。增大抽运光 1 功率,转换光 1 消光比增大,而转换光 2 消光比减小,抽运光 2 优化波长向长波长移动。图 7 反映了不同探测光波长下抽运光 2 波长对转换光两路时分信号消光比的影响。由于能带填充效应,探测光波长移向长波长时,转换光消光比降低。从消光比曲线中的三个交点所对应的位置来看,抽运光 2 优化波长受探测光波长影响较小。

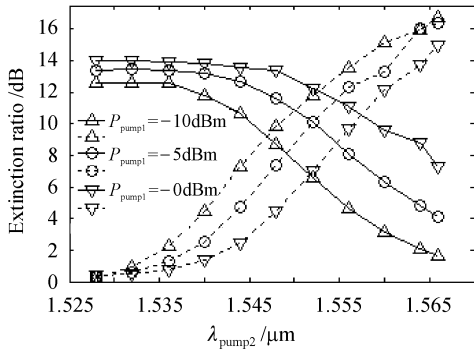


图 6 抽运光 1 功率不同时转换光消光比与抽运光 2 波长的关系

Fig. 6 Extinction ratio of converted signal versus the pump 2 wavelength with the different pump 1 power

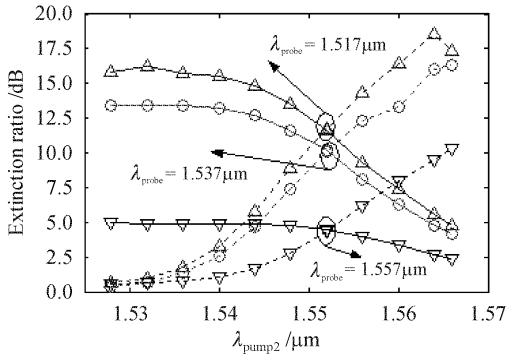


图 7 不同探测光波长下转换光消光比与抽运光 2 波长的关系

Fig. 7 Extinction ratio of converted signal versus the pump 2 wavelength with the different probe wavelength

### 3.4 转换光消光比和探测光波长的关系

图 8 为抽运光 2 功率不同时转换光消光比与探测光波长的关系。抽运光 2 功率一定条件下,输出消光比均随着探测光波长的增大先减小后增大,但增大的幅度趋于平缓。因而可以看出,上转换的消光比小于下转换的消光比,这主要取决于半导体光放大器的增益饱和特性。消光比差如图 9 所示,当

抽运光 2 功率等于 0 dBm 时,消光比差约 0~1 dB。图 10 则是反映了不同抽运光 2 波长下的转换光消光比与探测光波长的关系。增大抽运光 2 波长,转换光 1 消光比变小,转换光 2 消光比变大,消光比差如图 11 所示。当抽运光 2 波长为 1548 nm 时,消光比差约为 0~5 dB。系统存在优化的抽运光波长。

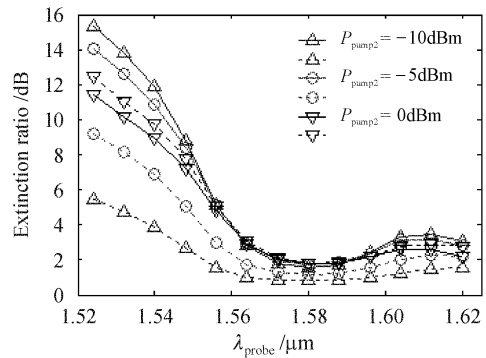


图 8 抽运光 2 功率不同时转换光消光比与探测光波长的关系

Fig. 8 Extinction ratio of converted signal versus the probe wavelength with the different pump 2 power

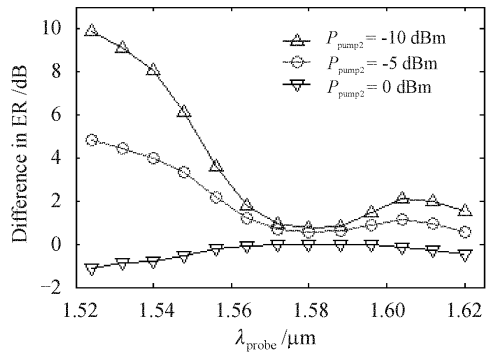


图 9 抽运光 2 功率不同时转换光消光比差与探测光波长的关系

Fig. 9 Difference in extinction ratio of converted signal versus the probe wavelength with the different pump 2 power

### 3.5 转换光消光比和抽运光消光比的关系

图 12 为抽运光 1 消光比不同时转换光消光比与抽运光 2 消光比的关系。抽运光 1 消光比一定时,转换光两路时分信号消光比随抽运光 2 消光比的增加几乎平行增大。增大抽运光 1 消光比,转换光 1 比转换光 2 消光比增加幅度大,则消光比差也在增加。图 13 反映了抽运光 2 功率不同时输出消光比和抽运光 2 消光比的关系。抽运光 2 功率的提高减小了消光比差,有利于转换光的功率均衡。

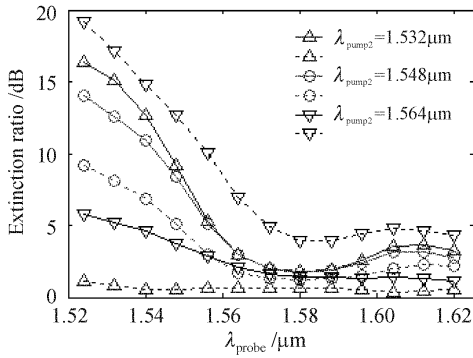


图 10 抽运光 2 波长不同时转换光消光比与探测光波长的关系

Fig. 10 Extinction ratio of covered signal versus the probe wavelength with the different pump 2 wavelength

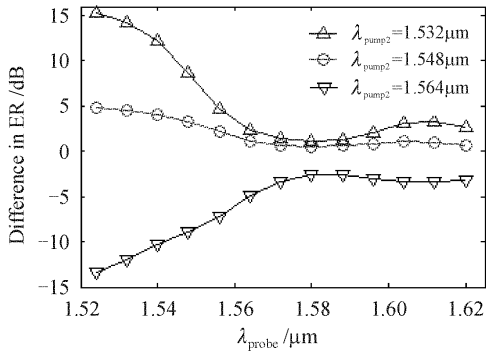


图 11 抽运光 2 波长不同时转换光消光比差与探测光波长的关系

Fig. 11 Difference in extinction ratio of covered signal versus the probe wavelength with the different pump 2 wavelength

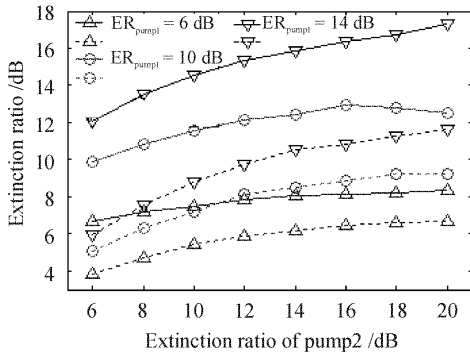


图 12 抽运光 1 消光比不同时转换光消光比与抽运光 2 消光比的关系

Fig. 12 Extinction ratio of covered signal versus the pump 2 extinction ratio with the different pump 1 extinction ratio

3.6 转换光消光比和半导体光放大器腔长的关系

图 14 为不同偏置电流下转换光消光比与半导

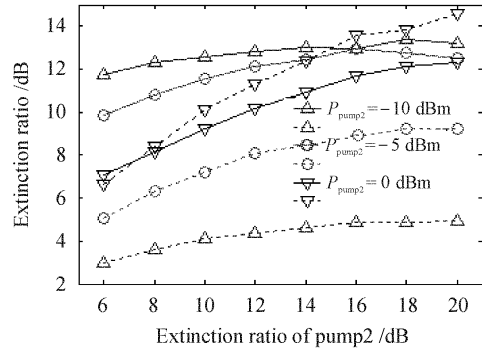


图 13 抽运光 2 功率不同时转换光消光比与抽运光 2 消光比的关系

Fig. 13 Extinction ratio of covered signal versus the pump 2 extinction ratio with the different pump 2 power

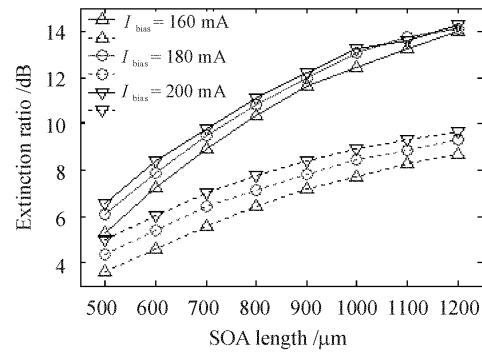


图 14 不同偏置电流下转换光消光比与半导体光放大器腔长的关系

Fig. 14 Extinction ratio of covered signal versus the SOA length with the different injection current

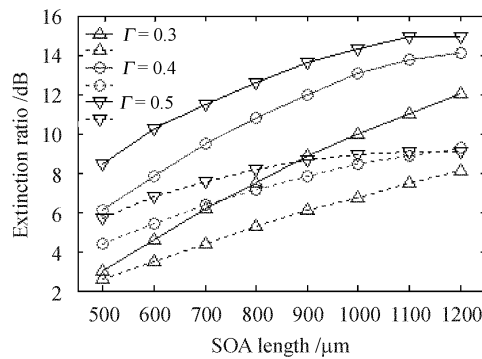


图 15 不同光场限制因子下转换光消光比与半导体光放大器腔长的关系

Fig. 15 Extinction ratio of covered signal versus the SOA length with the different confinement factor

体光放大器腔长的关系。一定偏置电流下,转换光两路时分信号消光比随半导体光放大器腔长增大而增大,但增大幅度不一致,消光比差增大。增大电流可以提高转换光消光比。图 15 反映了模场限制因

子对转换光消光比的影响。增大模场限制因子可以提高转换光消光比。

## 4 结 论

全光波长转换(AOWC)技术是实现波分复用光网络的关键技术之一,利用交叉增益调制-半导体光放大器(XGM-SOA)的全光波长转换是最有实用前景的技术。

### 参 考 文 献

- 1 M. A. Summerfield, J. P. R. Lacey, A. J. Lowery *et al.*. All-optical TDM to WDM conversion in a semiconductor optical amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(3):255~256
- 2 T. Yamamoto, T. Imai, T. Komukai *et al.*. Optical demultiplexing and routing of a TDM signal by using four-wave mixing and a novel wavelength router with optical circulators and fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(9):744~745
- 3 R. Ludwig, A. Ehrhardt, W. Pieper *et al.*. 40 Gbit/s demultiplexing experiment with 10 GHz all-optical clock recovery using a modelocked semiconductor laser [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(4):327~329
- 4 K. Uchiyama, H. Takara, T. Morioka *et al.*. 100 Gbit/s multiple-channel output all-optical demultiplexing based on TDM-WDM conversion in a nonlinear optical loop mirror [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(21):1989~1991
- 5 Michiaki Hayashi, Hideaki Tanaka, Kazuho Ohara *et al.*. OTDM transmitter using WDM-TDM conversion with an electroabsorption wavelength converter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(2):236~242
- 6 K. A. Williams, M. F. C. Stephens, D. Nasset *et al.*. WDM-TDM transmultiplexing at 40 Gbit/s using an integrated DFB laser amplifier [C]. *ECOC'1999*, B4.4
- 7 Ge Chunfeng, Huang Chao, Song Lijun *et al.*. All-optical OTDM-WDM wavelength conversion using SOA-XGM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10):1253~1255  
葛春风,黄超,宋立军等.利用交叉增益调制实现光时分复用-波分复用波长转换[J].*光学学报*, 2001, **21**(10):1253~1255
- 8 David Norte, Alan E. Willner. All-optical data format conversions and reconversions between the wavelength and time domains for dynamically reconfigurable WDM networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6):1170~1182
- 9 Kristof Obermann, Stephan Kind, 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
- 10 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
- 11 A. E. Willner, William Shieh. Optimal spectral and power parameters for all-optical wavelength shifting: Single stage, fanout, and cascability [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(5):771~781
- 12 Hanlim Lee, Hyunjae Yoon, Yonggyoo Kim *et al.*. Theoretical study of frequency chirping and extinction ratio of wavelength-converted optical signals by XGM and XPM using SOA's [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(8):1213~1219