

文章编号: 0258-7025(2005)06-0810-05

基于半导体光放大器中交叉偏振调制效应的 波长转换器

滕 翔, 张汉一, 郭奕理, 胡浪珍, 吴克瑛

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 为了改善基于半导体光放大器(SOA)中交叉偏振调制效应(CPM)的波长转换器的转换信号码型效应,对交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换器的工作原理进行了分析;通过讨论交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换脉冲的上升沿和下降沿的频率啁啾,结合滤波器的透过谱特性,提出了一种利用滤波器的波长正斜率边和波长负斜率边分别对正相转换信号和反相转换信号进行码型优化的方案,并进行了实验验证。在信号码率为 10 Gb/s 的交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换实验中,采用光带宽为 0.3 nm 的 JDS 滤波器优化转换信号的波形,基本消除了转换信号中长“1”码和长“0”码的码型效应,并将正相转换信号和反相转换信号的功率代价分别改善了 3 dB 以上。

关键词 光通信; 波长转换; 优化; 交叉偏振调制效应; 半导体光放大器; 码型效应

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

Performance Optimization of the Wavelength Converter Based on Cross-Polarization-Modulation in SOA

TENG Xiang, ZHANG Han-yi, GUO Yi-li, HU Lang-bin, WU Ke-ying

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In order to weaken the bit format effect of converted signal of wavelength converter based on cross-polarization-modulation in semiconductor optical amplifier (CPM-SOA), the principle of CPM-SOA wavelength converter is analyzed; and after discussing the characteristics of frequency chirping of converted signal pulses, a simple method is proposed to improve the bit format effect by using the positive or negative transmission slope of a filter to optimize the converted signal of in-phase or out-of-phase. 10 Gb/s wavelength conversion based on CPM-SOA experiment is demonstrated by using a JDS filter with 0.3 nm optical bandwidth, the bit format effect of long “1” bit and long “0” bit in converted signal is mostly eliminated, the converted signal of in-phase or out-of-phase is reshaped and their power penalties are reduced by more than 3 dB.

Key words optical communication; wavelength conversion; optimization; cross-polarization-modulation (CPM); semiconductor optical amplifier (SOA); bit format effect

1 引 言

波长转换是提高光网络的灵活度和可扩展性的关键技术之一。由于实用化的半导体光放大器(SOA)具有增益高、色散小、工作带宽大、增益偏振无关等特性,基于半导体光放大器的波长转换器一直是研究的重点,而这类波长转换多数是利用半导体光放大器中的交叉增益调制效应(XGM)或交叉相位调制

效应(XPM)^[1~4]。近年来,人们利用增益偏振无关的半导体光放大器中的交叉偏振调制效应(CPM),实现了 10 Gb/s 的无误码波长转换^[5],但是对于基于这种原理的波长转换器的性能分析和优化方案却很少有报道。本文以张应变体材料的增益偏振无关半导体光放大器为研究对象,分析了基于这种半导体光放大器的交叉偏振调制波长转换器的增益调制特性和相

收稿日期: 2004-06-30; 收到修改稿日期: 2004-10-25

基金项目: 国家 973 计划(TG2000036606)资助项目。

作者简介: 滕 翔(1978—),男,苗族,湖南湘西自治州人,清华大学电子工程系博士研究生,主要从事光网络中关键器件的研究。E-mail: txiang00@mails.tsinghua.edu.cn

位调制特性,提出了一种优化交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换信号的新方法。

2 实验原理和理论分析

2.1 增益偏振无关的半导体光放大器

如果只考虑受激辐射的作用,半导体光放大器的增益可描述为

$$G = E_{\text{out}}/E_{\text{in}} = \exp(\Gamma \cdot g \cdot L),$$

其中 E_{in} 为输入半导体光放大器的光振幅, E_{out} 为经半导体光放大器放大后输出的光振幅, Γ 为有源区的限制因子, g 为材料增益, L 表示有源区长度。

实际应用中的半导体光放大器往往要求其增益具有偏振不相关性,即入射光的 TE 模和 TM 模在经过半导体光放大器后获得的增益基本相等,可表示为

$$\Gamma_{\text{TE}} \cdot g_{\text{TE}} = \Gamma_{\text{TM}} \cdot g_{\text{TM}},$$

通常有三种方法获得增益不敏感的半导体光放大器:1) 有源区的横截面为正方形的体材料半导体光放大器^[6];2) 有源层为应变多量子阱结构的半导体光放大器^[7];3) 张应变的体结构半导体光放大器^[8]。由于张应变的体结构半导体光放大器的构造相对简单,给设计和制作带来比较大的灵活度,是比较常用的结构。这种半导体光放大器采用常见的扁平波导,即有源区的横截面是长方形的,因此 TE 模的限制因子大于 TM 模的限制因子;通过在有源区引入一定的张应变,增大 TM 模的材料增益,补偿 TE 模与 TM 模之间的增益,从而得到增益偏振不相关的半导体光放大器。为简化讨论,本文研究基于张应变的体结构半导体光放大器中的交叉偏振调制效应。

2.2 交叉偏振调制-半导体光放大器的工作原理

为了考察偏振态,可将入射半导体光放大器的探测光分解为 TE 模和 TM 模两个正交分量,并用琼斯矩阵来表示

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} A_{\text{TE}} \cdot \exp(j\phi_{\text{TE}0}) \\ A_{\text{TM}} \cdot \exp(j\phi_{\text{TM}0}) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

这里设 x 方向和 y 方向分别为 TE 模的电场振动方向和 TM 模的横向电场振动方向(TM 模的纵向场强分量远小于横向分量,可忽略), (1) 式中 A_{TE} 和 A_{TM} 分别表示探测光 TE 模与 TM 模的振幅,而 $\phi_{\text{TE}0}$ 和 $\phi_{\text{TM}0}$ 则分别表示这两个模式的初始相位。

当波长为 λ_s 的信号光与波长为 λ_c 的探测光同时注入到半导体光放大器中时(见图 1),信号光的

强度变化带来半导体光放大器中载流子浓度的变化,从而改变半导体光放大器有源区的增益和折射率,进而对探测光进行增益调制和相位调制。由于增益偏振无关,经过半导体光放大器后输出的探测光可表示为

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} A_{\text{TE}} \cdot \exp(j\phi_{\text{TE}1}) \\ A_{\text{TM}} \cdot \exp(j\phi_{\text{TM}1}) \end{bmatrix} \cdot G, \quad (2)$$

式中 G 表示半导体光放大器对 TE 模和 TM 模的增益, $\phi_{\text{TE}1}$ 和 $\phi_{\text{TM}1}$ 分别表示从半导体光放大器输出的探测光的 TE 模和 TM 模的相位。由于振幅的比值和相位的差值决定了光的偏振态,而 E_1 和 E_0 相比较,正交分量的振幅比没有变,因此偏振态的变化主要受相位调制效应的影响,即探测光正交分量相位差的改变。

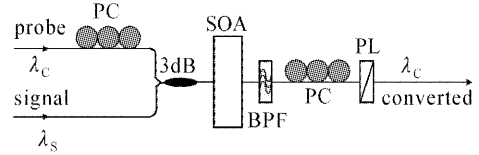


图 1 交叉偏振调制波长转换器的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-polarization modulation wavelength converter

PC: Polarization controller, BPF: Band pass filter, PL: Polarizer

利用半导体光放大器中增益与相移的变化关系^[9],经过长度 Δz 后,探测光波的相位变化可由下式描述

$$\begin{cases} \phi_{\text{TE}1} = \phi_{\text{TE}0} - \frac{\Delta z}{2} \cdot \Gamma_{\text{TE}} \cdot g_{\text{TE}} \cdot \alpha_{\text{TE}}, \\ \phi_{\text{TM}1} = \phi_{\text{TM}0} - \frac{\Delta z}{2} \cdot \Gamma_{\text{TM}} \cdot g_{\text{TM}} \cdot \alpha_{\text{TM}}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 α 为线宽展宽因子,它体现了半导体光放大器的材料增益与折射率之间的耦合关系。在有源区的张应变作用下: $g_{\text{TE}} \neq g_{\text{TM}}$, $\alpha_{\text{TE}} \neq \alpha_{\text{TM}}$ 。因此,尽管半导体光放大器具有增益偏振无关性,TE 模和 TM 模的相位改变量并不相等

$$\Delta\phi = (\phi_{\text{TE}1} - \phi_{\text{TM}1}) - (\phi_{\text{TE}0} - \phi_{\text{TM}0}) = \frac{\Delta z}{2} \cdot \Gamma_{\text{TE}} \cdot g_{\text{TE}} \cdot (\alpha_{\text{TM}} - \alpha_{\text{TE}}), \quad (4)$$

这里的 $\Delta\phi$ 表示经过长度为 Δz 有源区后,在信号光的调制下,探测光的正交分量相位差所获得的增量。 $\Delta\phi$ 在一定程度上也体现了探测光偏振态的变化量。从(4)式可以看出,由于交叉增益调制的作用, $\Delta\phi$ 随输入信号的光强而改变,相应的探测光的偏振态也受到信号光强的调制,即实现交叉偏振调制。另外,

半导体光放大器有源区波导本身的固有双折射效率也会影响到输出探测光的偏振态,但是它和信号光对载流子浓度的调制没有关系,只受晶体光轴取向和内部结构的影响,因此这里不作讨论。

由于接收机检测的是信号的强度,偏振态的变化在接收端一般无法检验,实验中采用偏振控制器和检偏器作为解调装置^[10,11],可以将偏振态调制信息转化为强度调制信息,得到所需要的波长转换信号。因为对于增益偏振不敏感的张应变体结构半导体光放大器,注入信号光的偏振态对半导体光放大器中载流子变化基本没有影响,故不考虑信号光的偏振态及其控制。

在偏振控制器和检偏器的偏振态解调作用下,这种基于交叉偏振调制效应的波长转换可得到比基于交叉增益调制效应的波长转换具有更高消光比的反相转换信号,并可以通过调节偏振控制器的波片,实现反相波长转换与同相波长转换的切换^[5]。然而,受半导体光放大器中载流子恢复速度的影响,交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换一般也有比较明显的码型效应,如图 4(a)和(c)所示:由于增益恢复速率不够快,反相转换信号的长 1 脉冲和同相转换信号的长 0 脉冲都出现下降沿功率高于上升沿功率的现象,这种码型效应将影响转换信号的传输特性,增加系统的功率代价。

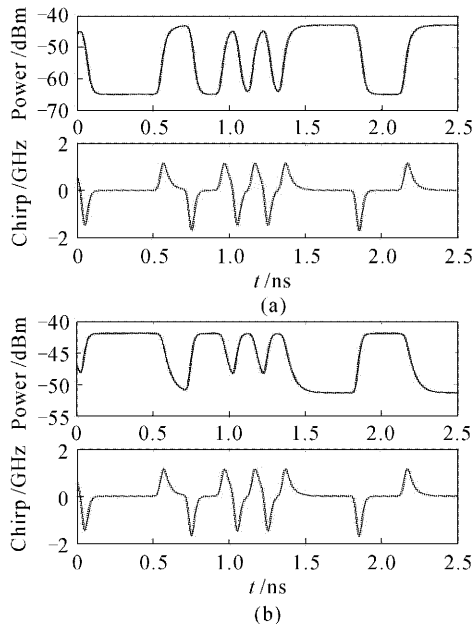


图 2 CPM-SOA 波长转换信号与啁啾的仿真结果
(a) 反相转换, (b) 同相转换

Fig. 2 Simulation results of CPM-SOA wavelength converted signals and their frequency chirping
(a) Out-of-phase conversion; (b) in-phase conversion

为了克服交叉偏振调制波长转换的码型效应,通过对其转换信号啁啾特性的理论分析,提出了用滤波器对交叉偏振调制波长转换进行码型优化的方案。

2.3 交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换器的啁啾特性

信号的啁啾体现了相位变化的方向和快慢,它是信号相位的时间导数,又称“瞬时频率”;啁啾反应了某一时刻信号的频率增量,正啁啾表示信号频率蓝移,负啁啾表示信号频率红移。啁啾的一般计算式^[9]

$$\Delta\nu = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$$

可以利用与研究交叉增益调制和交叉相位调制波长转换类似的方法,分析交叉偏振调制波长转换的啁啾特性。采用半导体光放大器的分段模型^[12]以及偏振器件的传输模型^[13],将探测光分解为两个正交分量进行讨论。由于经过检偏器的光都成为线偏振光,其正交方向上的相位差为零,因此对于最终得到的转换信号,只要考虑其中一个正交分量的啁啾就可以了。

图 2 给出计算得到的交叉偏振调制波长转换信号的啁啾特性。从图中可以看出,对于反相转换信号[图 2(a)],脉冲上升沿有正啁啾,下降沿有负啁啾;对于正相转换信号[图 2(b)],脉冲下降沿有正啁啾,上升沿有负啁啾。

利用转换信号的啁啾特性,给出了优化交叉偏振调制波长转换信号的方案,即可以利用滤波器对不同频率的光透过率不相等的特点,对交叉偏振调制波长转换信号进行脉冲整形,从而优化码型效应,其原理如下:由于反相转换信号的下降沿有负啁啾,因此下降沿的光频率红移,利用滤波器的负斜率边(波长域)可减少低频分量的通过率,使得脉冲下降沿的功率降低,减弱长 1 脉冲的码型效应;对于正相转换信号,其脉冲下降沿有正啁啾,相应的光频率蓝移,利用滤波器的正斜率边(波长域)可减少高频分量的通过率,减弱长 0 脉冲的码型效应。

3 实验装置与结果讨论

交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换的实验装置图如图 3 所示,为了减小自发辐射噪声的影响^[14],这里采用信号光与探测光同向传输的方式。探测光由外腔激光器产生,其输出波长和功率可调;偏振控制器 PC1 用于调整探测光的偏振态。信号光的波长固定(1555.7 nm),通过外调制的方式加

载 10 Gb/s 的信号,信号码源产生的是 2^9-1 的非归零伪随机码流 (NRZ-PSRB); 掺铒光纤放大器 (EDFA) 用于控制信号光的功率,带通滤波器 BPF1 可滤掉掺铒光纤放大器引入的自发辐射噪声。探测光和信号光通过 3 dB 耦合器,同时注入半导体光放大器并从另一端输出;带通滤波器 BPF2 用于滤除输出光中的信号光和半导体光放大器的自发辐射噪声。

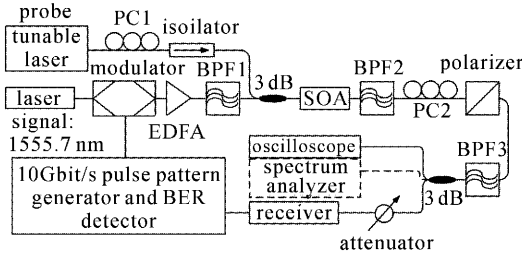


图 3 基于半导体光放大器的交叉偏振调制波长转换实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for the CPM wavelength conversion based on SOA

为了提高载流子的响应速率,给半导体光放大器加上 285 mA 的较高偏置电流。实验中探测光波长为 1559 nm。在没有滤波器 BPF3 的情况下,通过改变输入信号光和探测光的功率,并调节偏振控制器

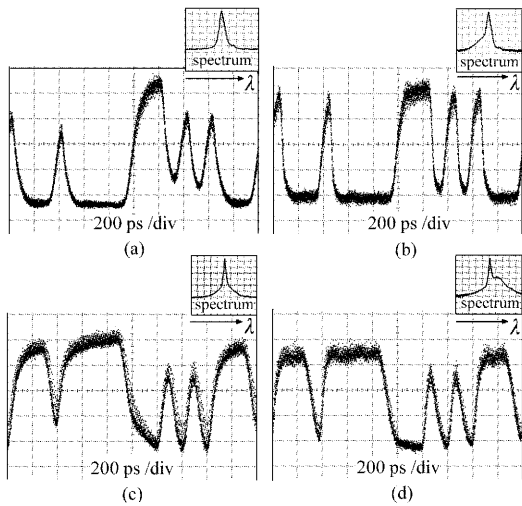


图 4 波长转换的波形与光谱
(a) 未经滤波器 3 整形的反相转换。
(b) 经滤波器 3 整形后的反相转换
(c) 未经滤波器 3 整形的正相转换,
(d) 经滤波器 3 整形后的正相转换

Fig. 4 Waveform and spectrum of wavelength conversion
(a) Out-of-phase conversion without reshaping,
(b) out-of-phase conversion with reshaping,
(c) in-phase conversion without reshaping,
(d) in-phase conversion with reshaping

PC1 与 PC2 的波片,可以分别得到反相波长转换 [图 4(a)]和正相波长转换[图 4(c)],二者都有比较严重的码型效应;其中反相波长转换的信号光功率为 7 dBm,探测光功率为 -1.5 dBm;正相波长转换的信号光功率为 3.6 dBm,探测光功率为 -1 dBm。

为了改善码型效应,在检偏器的输出端使用了 JDS 公司的 0.3 nm 可调滤波器。当输出反相转换信号时,可将滤波器 BPF3 的透过峰波长调节到比探测光波长短的位置,即让转换信号经过滤波器的波长负斜率边[见图 4(b)的光谱];当透过峰波长移动到合适的位置时,可以得到码型效应减弱的信号波形,如图 4(b)所示:整形后信号的长 1 脉冲上升沿和下降沿的功率基本相等;如果输出的是正相转换信号,则需要将滤波器 BPF3 的透过峰波长调节到比探测光波长长的位置,即让转换信号经过滤波器的波长正斜率边[见图 4(d)的光谱];当透过峰波长移动到恰当的位置时,也可以得到码型优化的信号波形,如图 4(d)所示,整形后信号的长 0 脉冲上升沿和下降沿的功率基本相等。

从图 4 给出的结果可知,用滤波改善后的波形 1 码功率和 0 码功率 (BER) 变得比较均衡,即原有不同的 1 码之间和不同的 0 码之间存在功率相差较大的现象被抑制;另外,整形后眼图的张开度变大,

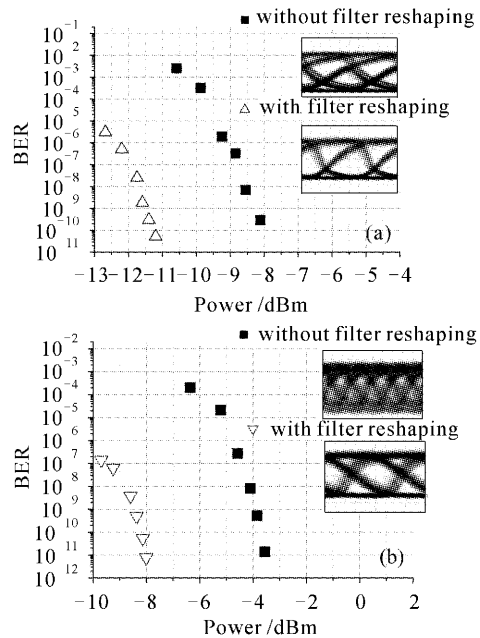


图 5 波长转换的误码率和眼图
(a) 反相转换; (b) 正相转换

Fig. 5 Bit error rate and eye-diagrams of wavelength conversion
(a) Out-of-phase conversion; (b) in-phase conversion

抖动小(见图 5),因此滤波器的优化将在一定程度上减少转换信号的误码。

图 5 给出了和图 4 相同的工作条件下,转换信号的误码率测试情况。图 5(a)为反相转换信号的误码率曲线,在误码率为 10^{-9} 时,滤波器整形后的信号功率代价比整形前降低了约 3.1 dB;图 5(b)给出正相转换信号的误码率曲线,整形后的信号功率代价比整形前降低了约 4.5 dB。

需要注意的是,为了得到码型较好的转换信号,应当合理选择滤波器的透过带宽,并将滤波器的透过峰值波长调节到合适的位置;因为对于不同的转换信号,透过曲线的斜率和透过率的大小对于码型效应有不同的影响。

4 结 论

通过讨论限制因子、材料增益和线宽展宽因子等参数对载流子调制效应的影响,较详细地阐述了交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换器的原理;并利用分段模型对这种波长转换器的啁啾特性进行了分析。实验证明,窄带滤波器(带宽 0.3 nm)对高速率的交叉偏振调制-半导体光放大器波长转换信号(10 Gb/s)具有一定的优化作用;利用滤波器的波长负斜率边,反相转换信号的功率代价减少了 3.1 dB;利用滤波器的波长正斜率边,正相转换信号的功率代价减少了 4.5 dB;滤波器的码型改善效应在转换信号的波形和眼图上也有明显的体现。

参 考 文 献

- 1 Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen *et al.*. All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 942~954
- 2 Dimitris Syvridis. All optical wavelength converters based on semiconductor optical amplifiers [C]. *S2000 International Semiconductor Conference*, 2000. 65~71
- 3 Jaafar M. H. Elmighani, Hussein T. Mouftah. All-optical wavelength conversion: technologies and applications in DWDM networks [J]. *IEEE Commun. Magazine*, 2000, **38**(3): 86~92
- 4 Toshiharu Miyahara, Atsushi Sugitatsu, Tatsuo Hatta *et al.*. Monolithically integrated SOA-MZI wavelength converter with assist DFB-LD [C]. *OFC2004*, 2004, TuS4: 22~27
- 5 Y. Liu, M. T. Hill, E. Tangdionga *et al.*. Wavelength conversion using nonlinear polarization rotation in a single semiconductor optical amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(1): 90~92
- 6 P. Doussiere, P. Garabedian, C. Graver *et al.*. 1.55 μm polarisation independent semiconductor optical amplifier with 25 dB fiber to fiber gain [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2): 670~172
- 7 Ma Hong, Yi Xinjian, Chen Sihai. 1.3 μm high-gain polarization-insensitive strained quantum-well semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 971~974
- 8 马宏,易新建,陈四海. 1.3 μm 高增益偏振无关应变量子阱半导体光放大器 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 971~974
- 9 Lijuan Yu, Weihua Guo, Chunlin Han *et al.*. The fabrication and characterization of polarization insensitive semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(Suppl.): 451~452
- 10 G. P. Agrawal, N. A. Olsson. Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulse in semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(11): 2297~2306
- 11 Mingshan Zhao, Jan De Merlier, Geert Morthier *et al.*. Dynamic birefringence of the linear optical amplifier and application in optical regeneration [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(6): 1399~1405
- 12 M. F. C. Stephens, M. Asghari, R. V. Panty *et al.*. Demonstration of ultrafast all-optical wavelength conversion utilizing birefringence in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(4): 449~451
- 13 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
- 14 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
- 15 Fred Heismann. Analysis of a reset-free polarization controller for fast automatic polarization stabilization in fiber-optic transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(4): 690~699
- 16 Zhang Xinliang, Huang Dexiu, Sun Junqiang *et al.*. Noise characteristics in XGM wavelength conversion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1256~1260
- 17 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): 1256~1260